



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

MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE  
CONCRETOS PUZOLÁNICOS PARA INCREMENTAR SU RESISTENCIA  
ANTE ATAQUES DE SULFATOS.

TESIS

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

Presenta:

Ing. Gilberto Cadena Espinosa

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

SINODALES

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Presidente

Dra. Teresa López Lara  
Secretario

Dr. Jaime Horta Rangel  
Vocal

Dr. René Salgado Delgado  
Suplente

Mtro. Héctor Eduardo Hernández Martínez  
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y  
Posgrado UAQ

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
25 de Septiembre de 2014  
México

## RESUMEN

En este trabajo se evaluaron 3 distintos tipos de materiales para sustituir al cemento en mezclas de mortero y de concreto. Se implementó un material de desecho de la industria agrícola en mezclas de mortero y de concreto sin afectar las propiedades mecánicas del concreto tradicional para poder lograr un concreto de mayor densidad y resistencia que sea más resistente a los ataques de agentes agresivos como lo son los sulfatos. Los materiales con los que se trabajo son la piedra pómez, la Ceniza de Bagazo de Caña de azúcar (CBC) y la Ceniza de Cascara de Arroz (CCA), obteniendo los mejores resultados con las cenizas. La investigación consistió en realizar sustituciones parciales de cemento por materiales con propiedades puzolánicas en porcentajes de 10, 20 y 30% en mezclas de mortero, evaluando su resistencia a la compresión a edades de 28, 60 y 100 días. Se determinaron las mejores mezclas que se acercaron mas a la resistencia de la mezcla de mortero sin sustitución de cemento, esta mezcla fue con la ceniza de cascara de arroz en un porcentaje del 20% de sustitución. La resistencia a la compresión de esta mezcla es menor que la mezcla de control a 28 días, pero se aprecia cómo va incrementando significativamente su resistencia en este periodo hasta llegar a los 60 días donde supera el valor de la mezcla de control. Una vez obtenida la mejor mezcla de mortero se realizaron mezclas de concreto con igual porcentaje de sustitución y se evaluó su resistencia a la compresión y su permeabilidad. Los resultados obtenidos con concreto en pruebas de compresión y permeabilidad a los 28 días fueron muy similares a los de la mezcla de control.

**Palabras clave:** puzolana, concreto, durabilidad, permeabilidad, ataques de sulfatos.

## ABSTRACT.

In this paper three different materials were evaluated to replace the cement in mortar mixes and concrete. Waste material from agricultural industry was implemented in mixtures of mortar and concrete without affecting the mechanical properties of traditional concrete in order to achieve a higher density and resistance that is more resistant to attack of aggressive agents such as sulphates. The materials that were tested are pumice, ash sugarcane bagasse (CBC) and rice husk ash (CCA), the best results with the ashes. The research was to perform partial cement replacement materials with pozzolanic properties by percentages of 10, 20 and 30% in mortar mixes, assessing compressive strength at ages 28, 60 and 100 days. The best mixes that were closer to the strength of the mortar mix without cement replacement were determined; this mixture was with rice husk ash at a rate of 20% substitution. The compressive strength of this mixture is less than the control mixture at 28 days, but shows how will significantly increase its strength in this period up to 60 days which exceeds the value of the control mixture. Once the best mortar mix was obtained, concrete mixes were made with the same percentage of substitution and its compressive strength and permeability was evaluated. The results obtained with concrete in compression and permeability test at 28 days were very similar to the control.

**Key words:** pozzolan, concrete, durability, permeability, sulfate attacks.

## **DEDICATORIA**

A mi madre, la Sra. Ma. Carmen Espinoza Retana, que me brindó su apoyo incondicional en todo momento.

A mi padre, el Ing. Martin Cadena Hernández porque gracias a él me convertí en lo que soy. Porque más que mi padre, ha sido un gran amigo.

A todos mis compañeros y familiares que estuvieron presentes durante todo este tiempo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis compañeros del posgrado Ángel, Godoy, Alejandro, José Luis, Federico, Christian, David y Diego, por la orientación, ayuda, amistad y experiencias vividas durante este periodo.

Al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, por ser mi mentor, guía, amigo, ya que con su apoyo fue posible terminar este proyecto, además por darme la oportunidad y confianza de trabajar bajo su dirección.

A todos los catedráticos del área de Construcción de la Universidad Autónoma de Querétaro por haberme transmitido parte de sus conocimientos, y especialmente a mis sinodales el Dr. René Salgado Delgado y al Mtro. Héctor Eduardo Hernández Martínez por su colaboración en esta investigación, al Dr. Trinidad Pérez, al Dr. Eric M. Rivera Muñoz y a la Dra. Beatriz Millán Malo por su aportación para la culminación de este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por darme la oportunidad de forjarme como profesionalista.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su invaluable ayuda, ya que fue pieza clave para el desarrollo profesional, académico y personal para lograr la culminación de este proyecto.

# ÍNDICE

<b>Contenido</b>	<b>Página</b>
RESUMEN .....	i
ABSTRACT.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
ÍNDICE .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
I.1. Hipótesis .....	4
I.2. Objetivo .....	4
I.2.1 Objetivos específicos.....	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	5
II.1. Microestructura del concreto .....	7
II.2. Daños en el concreto .....	7
II.3. Concretos Puzolánicos.....	11
II.3.1 Clasificación de las puzolanas.....	12
II.3.2 Puzolanas Naturales.....	13
II.3.3 Puzolanas Artificiales.....	13
II.3.4 Usos de las puzolanas.....	13
II.4 Puzolanas utilizadas en la investigación .....	15
II.4.1 Cenizas de Cáscara de Arroz (CCA). .....	15
II.4.2 Ceniza de Bagazo de Caña de azúcar (CBC). .....	19
II.4.3 Piedra pómez.....	21
III. METODOLOGÍA.....	23
III.1. Materiales utilizados para la sustitución parcial de cemento ...	24

III.1.1 Piedra pómez.....	24
III.1.2 Ceniza de Bagazo de Caña de azúcar (CBC) .....	30
III.1.3 Cascara de arroz .....	33
III.1.4 Quema de la cascara de arroz para obtención de cenizas	35
III.2. Material Inerte (Arena de Rio) .....	38
III.2.1 Humedad de la arena .....	40
III.3. Pulverización de los materiales .....	42
III.4. Cribado del material de investigación.....	44
III.5. Métodos de pruebas.....	46
III.5.1 Cemento Pórtland.....	46
III.5.2 Elaboración de mezclas.....	46
III.5.3. Elaboración de probetas .....	50
III.5.4. Elaboración de cilindros de concreto .....	51
III.5.5. Determinación de resistencia a compresión .....	55
III.5.6. Densidad, absorción y vacios en concreto endurecido.....	61
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	64
IV.1. Sustituciones en morteros .....	64
IV.2 Sustituciones en concreto .....	70
IV.3 Densidad, absorción y porcentaje de vacios en concreto .....	71
IV.4 Difracción de rayos x .....	73
V. CONCLUSIONES .....	79
LITERATURA CITADA.....	81
ANEXO A. Compresión en mortero con sustitución de piedra pómez.....	85
ANEXO B. Compresión en mortero con sustitución de CBC.....	87
ANEXO C. Compresión en mortero con sustitución de CCA.....	89
Anexo d. Difractograma e interpretación .....	91

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
3.1 Número de especímenes realizados y porcentajes de sustitución en diferentes mezclas de mortero .....	47
3.2 Proporciones de agregados para elaboración de especímenes de mortero .....	48
3.3 Proporciones para pruebas en concreto a 28 días.....	52
4.1 Resistencia a compresión kg.f sustitución con piedra pómez .....	64
4.2 Resistencia a compresión kg/cm <sup>2</sup> sustitución con piedra pómez.....	64
4.3 Resistencia a compresión kg.f sustitución con CBC .....	66
4.4 Resistencia a compresión kg/cm <sup>2</sup> sustitución con CBC .....	66
4.5 Resistencia a compresión kg.f sustitución con CCA .....	68
4.6 Resistencia a compresión kg/cm <sup>2</sup> sustitución con CCA.....	68
4.7 Resultados de resistencia del concreto con sustitución de 20% de cemento Pórtland por CCA .....	70
4.8 Resultados de norma ASTM C 642-06.....	71
4.9 Resultados de norma ASTM C 642-06 (continuación) .....	72



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Composición de la pasta de cemento fresca y endurecida en la máxima hidratación para varias relaciones a/c (Bernal, 2009). .....	6
2. Acción de los sulfatos (Bernal, 2009). .....	9
3. Clasificación de las Puzolanas (Hernández, 2007). .....	13
4. Localización del banco de material donde se extrajo la piedra pómez en el estado de Querétaro. ....	24
5. Panorama minero del estado de Querétaro. ....	26
6. Banco de material donde se extrajo la piedra pómez.....	27
7. Estrato de aproximadamente 1.5m a 2m compuesto de piedra pómez donde se recolecto el material. ....	28
8. Piedra pómez colocada en charola con humedad natural para posteriormente introducirla al horno de secado. ....	29
9. Localización del ingenio azucarero donde se recolecto la ceniza de bagazo de caña de azúcar CBC. ....	30
10. Ceniceros de la caldera bagacera número dos. ....	32
11. Tolvas y ciclones de la caldera bagacera número dos.....	32
12. Ubicación geográfica de la arrocera San José. ....	33
13. Cascara de arroz recolectado proveniente del tipo de arroz A70.....	34
14. Horno crematorio utilizado para incinerar la cascara de arroz ubicado en la ciudad de San Miguel de Allende, Guanajuato.....	35
15. Proceso de incineración de la cascara de arroz, horno trabajando con el quemador principal.....	36
16. Muestra del tipo de ceniza de cascara de arroz obtenida después del proceso de quema.....	37
17. Arena extraída de rio sin cribar. ....	38
18. Proceso de criba de la arena entre las mallas no. 30 y 60.....	39
19. Arena que pasa por la malla no. 30 y se retiene en la malla no. 60. ....	39
20. Prueba del cono de arena, material saturado siendo secado parcialmente. ....	40

21. Prueba del cono de arena, del lado izquierdo material en condición saturado y superficialmente seco. Del lado derecho 500 gr de material en dicha condición para ser introducido al horno durante 24 h.....	41
22. Máquina para pulverización del material.....	42
23. Interior de la maquina pulverizadora donde se aprecian los discos donde el material es procesado.....	43
24. Cribado en seco de los materiales a través de la malla no. 200. ....	44
25. Criba de los materiales por medio de tamizador de control.....	45
26. A la izquierda material sin mezclar para elaboración de mortero. A la derecha material revuelto para obtener una mezcla homogénea.....	49
27. Material totalmente homogenizado con ayuda de una espátula.....	49
28. Cubos de mortero y moldes con mezcla en la cámara de curado.....	50
29. En la parte izquierda cubos con sustitución de CCA, en el centro cubos de control (sin sustitución) y en la parte derecha cubos con sustitución de CBC.	51
30. Agregados para realizar mezcla de concreto y molde para verificar revenimiento.....	53
31. Del lado izquierdo materiales para mezcla de concreto sin sustitución, del lado derecho mezcla de concreto con 20% de sustitución de CCA. ....	53
32. Moldeado de cilindros de concreto.....	54
33. Cilindros de concreto inmersos en agua. ....	55
34. Determinación del peso de los especímenes antes de evaluar su resistencia a compresión.....	55
35. Cubos de mortero colocados en maquina universal para prueba de compresión.....	56
36. Diferentes tipos de fallas presentes en los morteros.....	57
37. Determinación del peso de los cilindros de concreto después de ser extraídos del proceso de curado. ....	58
38. A la izquierda preparación de azufre, a la derecha cilindros parcialmente cabeceados.....	58
39. Cilindro colocado en la maquina universal en espera de aplicación de carga. ....	59
40. Fallas ocurridas en los cilindros de control.....	60
41. Fallas ocurridas en los cilindros con 20% de sustitución de CCA. ....	60

42. Cubos de concreto utilizados para pruebas de densidad, absorción y porcentaje de vacíos. ....	61
43. Cubos de concreto ingresando al horno para periodo de secado. ....	62
44. Del lado izquierdo se muestran los cubos recién colocados al fuego, del lado derecho se muestran los cubos en ebullición para obtener el valor C de la norma ASTM C 642-06. ....	63
45. Determinación del peso sumergido de los cubos de concreto. ....	63
46. Resistencia a compresión vs tiempo, sustitución con piedra pómez.....	65
47. Resistencia a compresión vs tiempo, sustitución con CBC.....	66
48. Resistencia a compresión vs tiempo, sustitución con CCA.....	68
49. Resistencia a compresión vs tiempo de mejores mezclas, 10% pómez, 30% CBC y 20% CCA .....	69
50. Equipo utilizado para la elaboración de pasta de cemento y sustitución de CCA.....	73
51. Pasta de cemento con sustitución de CCA colocada en molde para contracción.....	74
52. A la izquierda molienda de la pasta de cemento mediante un mortero de porcelana, a la derecha malla no. 200 .....	75
53. Resultados de DRX.....	76

## I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevos materiales de construcción ha empezado a tener un auge mayor en los últimos años en varios países del mundo, esto se debe en parte a que la producción de materiales tradicionales genera un impacto ecológico negativo, las grandes cantidades de recursos energéticos requeridas para obtenerlos son generalmente irrecuperables, además de las emisiones generadas en sus procesos de producción. Esto ha llevado a buscar nuevas fuentes que puedan llegar a reemplazar o formar parte de ciertos materiales, tal es el caso de los subproductos industriales y agrícolas, que generalmente son producidos en varios países y representan un desecho de la producción de distintos productos (Águila, 2001).

La industria de la construcción se ha desarrollado gracias al cemento Pórtland, ya que con este se produce el concreto, que es el principal material de construcción utilizado hoy en día, gracias a sus propiedades de trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad, aunado con el acero lo convierten en un excelente material para el desarrollo de infraestructura. El alto costo de producción y la gran cantidad de energía que demanda el cemento, ha provocado investigaciones para encontrar nuevos tipos de aglomerantes, dando como resultado el estudio de diversos tipos de puzolanas, tanto las que se obtienen de manera natural y sobre todo las que se producen de manera artificial.

Se ha demostrado en diversas investigaciones que a partir de diferentes tipos de puzolanas se puede lograr incrementar las propiedades mecánicas del concreto además de incrementar su durabilidad por medio de la reducción de los poros que contiene.

Actualmente varios tipos de subproductos industriales o agrícolas como cenizas volantes, humo de sílice y ceniza de cascara de arroz han sido ampliamente utilizados como material puzolánico en el concreto. Su utilización no solo mejora las propiedades del concreto, sino que también ayuda a

preservar el ambiente (Sata et al., 2007). Estos materiales puzolánicos pueden mejorar tanto la resistencia como también la durabilidad del concreto cuando son utilizadas como mezclas minerales en concretos de alta resistencia. Esto es debido a que el hidróxido de calcio producido por la hidratación del cemento reacciona con la puzolana (Rukzon y Chindaprasirt, 2011).

Por lo anterior, se decidió trabajar con 3 tipos de materiales, piedra pómez, ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de cascara de arroz. Para la obtención de las cenizas de cascara de arroz fue necesario incinerar la cascara de arroz en un horno a una temperatura no mayor a 500°C en un lapso menor de 10 minutos, esto para producir una ceniza con la mayor cantidad de sílice amorfa. La ceniza de bagazo de caña de azúcar fue obtenida en un ingenio azucarero del estado de Veracruz. Se ha demostrado que estas cenizas tienen propiedades puzolánicas (Hernández, 2007), dando como resultado la sustitución de cemento por ceniza en mezclas de mortero en un 6 %. La piedra pómez fue recolectada en el estado de Querétaro, en un banco de material donde es extraída y comercializada como arenilla utilizada en rellenos de azoteas.

Se decidió realizar sustituciones de cemento por estos materiales en mezclas de mortero en porcentajes de 10, 20 y 30% para después evaluar su resistencia a la compresión. Estos porcentajes tuvieron como objetivo sustituir la mayor cantidad de cemento posible, para producir un mortero con características mecánicas similares al producido con cemento Pórtland. Los resultados de las sustituciones con piedra pómez se encontraron muy por debajo de la mezcla de control, pero las sustituciones con cenizas de bagazo de caña de azúcar arrojaron mejores resultados que la muestra de control evaluando su resistencia a compresión 100 días. La mezcla con 20% de sustitución es la que más se acercó a los resultados de control, su resistencia a edades de 28 días se encontró en un 76% en relación con el control, y a 100 días llegó al 92% de la resistencia de control.

A través de esta tesis se revisan aspectos de la microestructura del concreto y de los principales daños que se ocasionan por el ataque de agentes

agresivos como lo son los sulfatos. Se hace una recopilación de material donde se mencionan investigaciones similares en todo el mundo, con sustituciones en porcentajes similares y con resultados diferentes, lo que nos lleva a decir que aunque se trabaja con los mismos materiales, estos tienen propiedades que varían de una región a otra, por lo que cada trabajo trata de aportar los resultados encontrados con materiales vernaculares.

## I.1. Hipótesis

La sustitución parcial de cemento por puzolanas de origen natural o subproductos de la industria agrícola, permiten al concreto reducir su permeabilidad e incrementar su resistencia para proveer una mayor durabilidad en ambientes agresivos.

## I.2. Objetivo

Desarrollar un concreto con baja porosidad por medio de la inclusión de materiales con características puzolánicas, para lograr una mayor resistencia a la degradación por sales además de disminuir el contenido de cemento requerido para la producción de concreto.

### *I.2.1 Objetivos específicos*

1. Caracterizar los componentes químicos de los materiales para clasificarlos como puzolanas y poder incluirlos al cemento.
2. Determinar los porcentajes óptimos de sustitución de cemento por puzolana para obtener una resistencia similar a la del concreto hecho a base de cemento Pórtland.
3. Calificar la resistencia del concreto puzolánico y su permeabilidad para compararla con las características del concreto hecho a base de cemento Pórtland.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

A nivel mundial, el concreto es el material más utilizado en la construcción, y a menos que haya una revolución en los materiales de construcción, seguirá siéndolo; gran parte de la infraestructura de los países está elaborada con él, por lo que su conocimiento y tecnología son básicos para el ingeniero civil encargado de alguna etapa del proceso constructivo. Es un tema con implicaciones socioeconómicas. El Reino Unido, un país desarrollado, destina 40% de la inversión en construcción a la reparación y al mantenimiento, 4% de su Producto Interno Bruto (Neville, 2001). Un país subdesarrollado como el nuestro, ¿cuánto destina? El ahorro que pueda lograr un país en 30 años por investigar y construir ahora estructuras durables puede ser un detonante fundamental en el futuro, dada la escasez de materiales y recursos (Hernández y Mendoza, 2006).

La durabilidad es una de las características claves que han permitido el uso generalizado del concreto (ACI 201.2R-08, 2008). Se considera un concreto de buena calidad cuando este permite alcanzar una buena resistencia y durabilidad (Neville, 2004). El concreto se define como una mezcla de cemento, agregados inertes y agua, la cual se endurece después de cierto tiempo mezclado. Los elementos que componen el concreto se dividen en 2 grupos: activos e inertes. Son activos, el agua y el cemento a cuya cuenta corre la reacción química por medio de la cual esa mezcla, llamada lechada, se endurece – fragua – hasta alcanzar un estado, en general de gran solidez, mientras que los agregados inertes son en general grava y arena (Bernal, 2009).

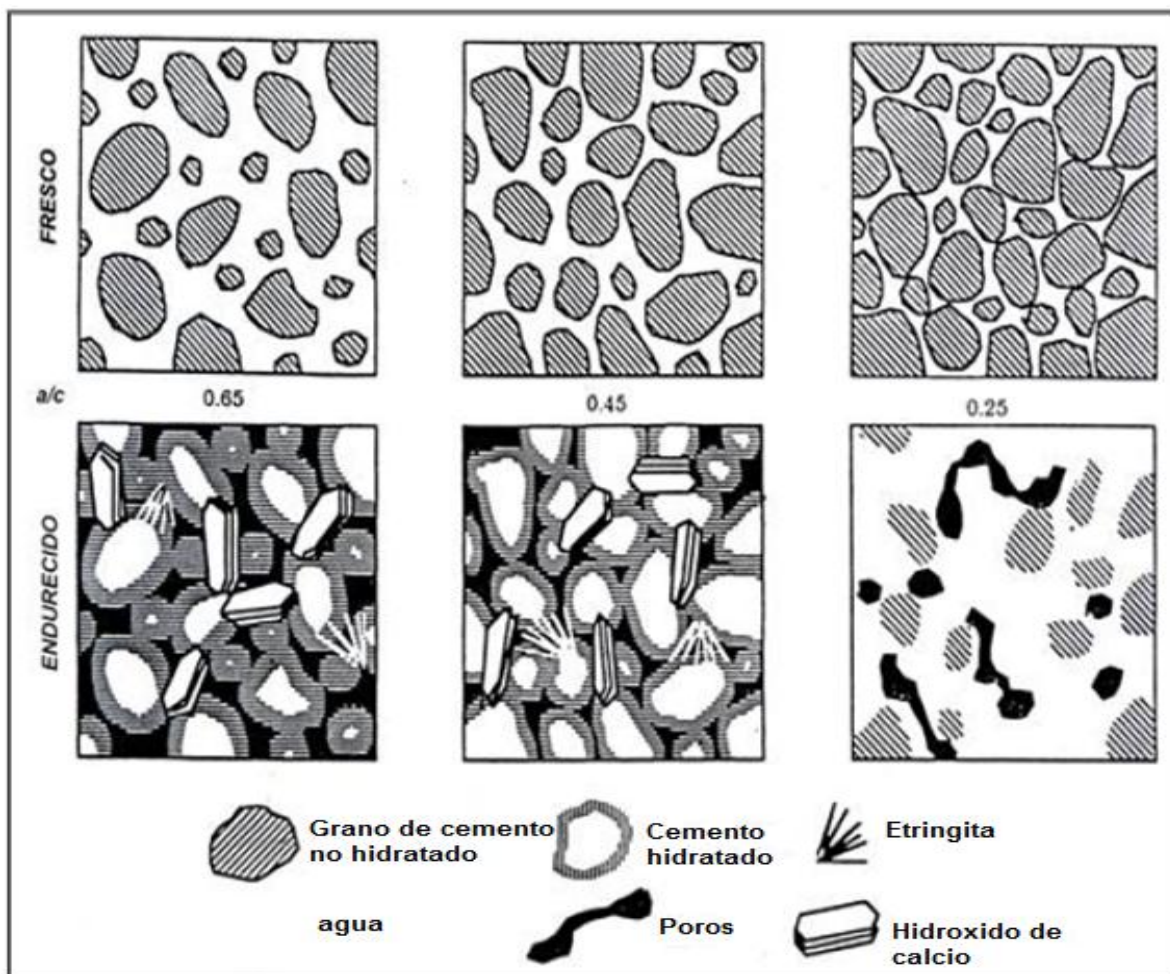
El concreto se comporta satisfactoriamente bajo exposiciones correspondientes a diferentes condiciones atmosféricas, a la mayoría de las aguas y suelos que contienen químicos. Sin embargo, existen algunos ambientes químicos en los cuales, a menos de que se tomen medidas específicas, la vida útil será breve. Para que se presenten la mayoría de los



procesos físicos y químicos que ocurren en el concreto, tanto deseables como los perjudiciales, es necesario la presencia de agua (ACI 201.2R-01, 2001).

El uso cada vez más difundido del concreto en países con clima cálido ha evidenciado como la temperatura agrava los procesos químicos perjudiciales, tales como la corrosión y las reacciones álcali-agregado.

A pesar de que el concreto aparenta ser un material homogéneo, tiene a un nivel de escala micro, una gran variedad de poros u oquedades por donde los agentes que producen su degradación son introducidos y depositados provocando así la corrosión del acero que pone en riesgo la seguridad del elemento afectado y disminuyendo la vida útil de la estructura. En la figura 1 se puede apreciar la variación del nivel de porosidad correspondiente a pastas de cemento con diferentes relaciones de agua/cemento.



**Fig. 1 Composición de la pasta de cemento fresca y endurecida en la máxima hidratación para varias relaciones a/c (Bernal, 2009).**

## II.1. Microestructura del concreto

Es la estructura material en estado sólido generada por el fraguado del cemento y cuyos tamaños son inferiores a 0.20 mm. Por lo que la microestructura es la fase sólida, en la que el concreto ha logrado un desarrollo mecánico debido al estado avanzado de las reacciones químicas del cemento con el agua, produciéndose en cierta rigidez conferida por los nuevos productos que se genera.

Las características de la microestructura del concreto están relacionadas con la porosidad de la pasta de cemento endurecido, la conexión entre los poros, la distribución de sus tamaños, capacidad para el transporte de fluidos, relaciones y equilibrios entre los diferentes productos de la hidratación, la naturaleza de la interfaz entre la pasta hidratada y el agregado, así como otros factores.

Debido a la consistencia rígida del concreto, anteriormente se creía que tenía una larga vida útil; sin embargo, la experiencia ha demostrado que no siempre es así. Los ejemplos en la construcción de estructuras de concreto con problemas, ante sus condiciones de servicio son abundantes y de diferente naturaleza, éstos se han tenido que explicar, enfrentar y resolver desde diferentes trincheras como investigaciones serias, teorías, fórmulas, sistemas constructivos, pruebas de laboratorio y campo, todo ello con el objetivo de diagnosticar problemas de durabilidad y conocer los factores que en ella intervienen (Bernal, 2009).

## II.2. Daños en el concreto

El deterioro o el mal funcionamiento de las estructuras, puede darse por causas congénitas o adquiridas, pero también a razón de cambios en su funcionamiento. Tradicionalmente, el estudio de las patologías siempre se enfocaba desde un punto de vista estructural y de diseño; pero ahora el análisis

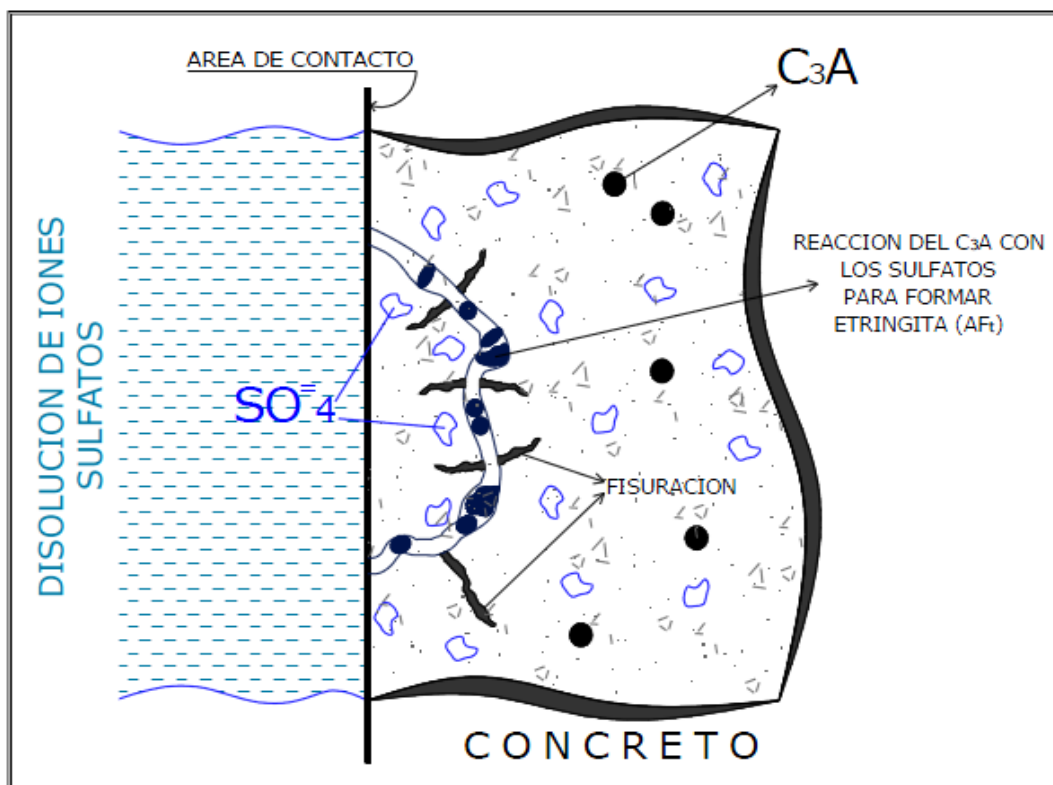
contempla otros elementos como suelos, calidad de los materiales, factores ambientales y pruebas de laboratorio.

Antiguamente los agregados del concreto se consideraban como un material inerte disperso en la pasta de cemento y utilizados únicamente por razones económicas. Sin embargo, el agregado no es totalmente inerte y sus propiedades físicas, térmicas y algunas también químicas influyen en la eficiencia del concreto. El agregado es más barato que el cemento, pero la economía no es la única razón para utilizar agregados sino su ventaja técnica de brindar estabilidad de volumen y mejor durabilidad del concreto (Jiménez, 2001).

Para producir un ataque significativo en el concreto, los químicos agresivos deben estar en solución. Algunos de los factores que afectan la capacidad del concreto para resistir el deterioro son la exposición a sulfatos, el ión cloro del agua de mar, los ácidos y la carbonatación. La resistencia a los sulfatos presentes en el suelo, el agua del suelo o el agua de mar se logra utilizando materiales cementicios adecuados y mezclas de concreto correctamente dosificadas con bajas relaciones de agua cemento (*a/c*) sujetas a un adecuado control de calidad.

Los sulfatos de sodio, potasio, calcio o magnesio que ocurren en la naturaleza, los cuales pueden atacar al concreto endurecido, algunas veces se encuentran en el suelo y otras disueltos en el agua adyacente a las estructuras de concreto. Las sales de sulfato en solución ingresan al concreto y atacan los materiales cementicios. Si en una superficie expuesta al aire se produce evaporación, los iones sulfato se pueden concentrar cerca de dicha cara y aumentar el potencial de deterioro. Las dos consecuencias del ataque por sulfatos sobre los componentes del concreto mejor conocidos son la formación de etringita (aluminato de calcio trisulfato 32-hidratado,  $CaO * Al_2 O_3 * 3CaSO_4 * 32H_2O$ ) y yeso (sulfato de calcio dihidratado  $CaSO_4 * 2H_2O$ ) (ACI 201.2R-01, 2001).

Los iones sulfatos reaccionan con los aluminatos cálcico hidratados del clinker de cemento Pórtland formando la sal de Candlot o etringita, que es muy poco soluble en agua y provoca un gran aumento de volumen del orden del 250% en relación a los reactivos iniciales. Esta expansión produce grandes tensiones internas que, por lo general, no pueden ser absorbidas por el material y desencadena una serie de fisuras y desprendimientos superficiales de material. En la figura 2 se representa la interacción de los iones sulfatos con el aluminato tricálcico para formar etringita.



**Fig. 2 Acción de los sulfatos (Bernal, 2009).**

La etringita primaria se produce en la hidratación de cemento Pórtland, dependiendo su formación de la temperatura, alcalinidad del concreto y de las concentraciones de sulfatos y aluminatos. Con temperaturas superiores a  $65^{\circ}C$  se descompone y se forma monoaluminato tetracálcico liberándose iones sulfatos que se absorben en el gel C-S-H; estos iones van a ser los que más adelante vuelvan a formar etringita (diferida) produciendo tensiones internas en la pasta de cemento. Por otro lado, se ha encontrado que

la etringita (secundaria) se puede formar en fisuras y poros sin que necesariamente cree tensiones.

La formación de etringita cuando el concreto se encuentra en estado plástico no produce expansiones negativas para el concreto. Esta a su vez puede transformarse en monosulfato de calcio hidratado.

Cuando el contenido de iones sulfato supere los 600 mg/L en disolución o 3000 mg/kg en suelos, se recomienda el empleo de cementos con la característica de resistencia a sulfatos. El sulfato proviene del yeso, anhídrido, etc..., que se emplea como regulador de fraguado del cemento y de las materias primas. Además, los iones sulfatos pueden provenir de distintas sales: sulfatos de calcio (yeso), sulfatos alcalinos, sulfatos magnesio, etc. Por ejemplo, el sulfato sódico puede reaccionar con los iones de calcio de la fase acuosa produciendo yeso secundario que produce un aumento de volumen del 17.7 %. Este a su vez reaccionara con el aluminato tricalcico para forma etringita expansiva. Por otro lado, el sulfato magnésico podría formar yeso secundario y brucita (Bernal, 2009).

La formación de yeso puede provocar ablandamiento y pérdida de resistencia del hormigón. Algunos de los procesos relacionados con los sulfatos pueden dañar al concreto incluso sin expansión. Por ejemplo, un concreto expuesto a sulfatos solubles puede sufrir ablandamiento de la matriz de la pasta o un aumento de su porosidad global; estos dos efectos pueden reducir su durabilidad (ACI 201.2R-13, 2001).

En el concreto armado en contacto -permanente o intermitente- con agua de mar, los sulfatos y cloruros de calcio, magnesio y alcalinos, que se encuentran de forma inseparable, pueden penetrar por porosidad, capilaridad, ósmosis y difusión. Los sulfatos atacan al concreto formando compuestos expansivos causantes de fisuración. Los cloruros, si llegan hasta la armadura, causan la despasivación de ésta y provocan su corrosión (Bernal, 2009).

Un gran número de procesos destructivos debidos a la formación de sales se puede relacionar con la agresividad de los sulfatos. El ion sulfato causante de la degradación del concreto puede estar presente en el suelo o en el agua subterránea o freáticas, en soluciones acuosas de ácido sulfúrico o en formas de sales, sulfatos que son identificados como anión  $SO_4^{-2}$ .

Las sales de sulfatos dañinas al concreto están presentes principalmente en suelos selenitosos con yeso y en aguas freáticas de estos mismos suelos, cabe hacer mención que el agua de mar aparte de contener sales de sulfatos está compuesta de otras sales cuyo trabajo químico en conjunto, así como la exposición la hacen ser de mediana a severamente dañina. Las aguas principalmente dañinas son aquellas que contienen concentraciones de: sulfato de calcio (yeso), sulfato de sodio, sulfato de magnesio y aguas de desechos industriales. Los sulfatos en forma de sales altamente agresivos son: de amonio, calcio, magnesio y de sodio. Los sulfatos que se consideran menos agresivos son: de cobre, de aluminio de bario, por ser insolubles al agua (Bernal, 2009).

La resistencia a los sulfatos del cemento Pórtland generalmente disminuye cuando aumenta el contenido calculado de tricalcio-aluminato ( $C_3A$ ). La norma ASTM C 150 incluye al cemento resistente a los sulfatos Tipo V, para el cual el contenido máximo calculado de  $C_3A$  permitido es de 5%, y el cemento moderadamente resistente a los sulfatos Tipo II, para el cual el contenido máximo calculado de  $C_3A$  permitido está limitado a 8%.

### II.3. Concretos Puzolánicos

Los concretos puzolánicos consisten en el reemplazo parcial del cemento Pórtland por materiales con características puzolánicas.

La puzolana es un material natural o artificial que contiene sílice en forma reactiva. La norma ASTM C 618 describe la puzolana como un material silíceo o silíceo y aluminoso el cual, en si mismo posee poco o ningún valor

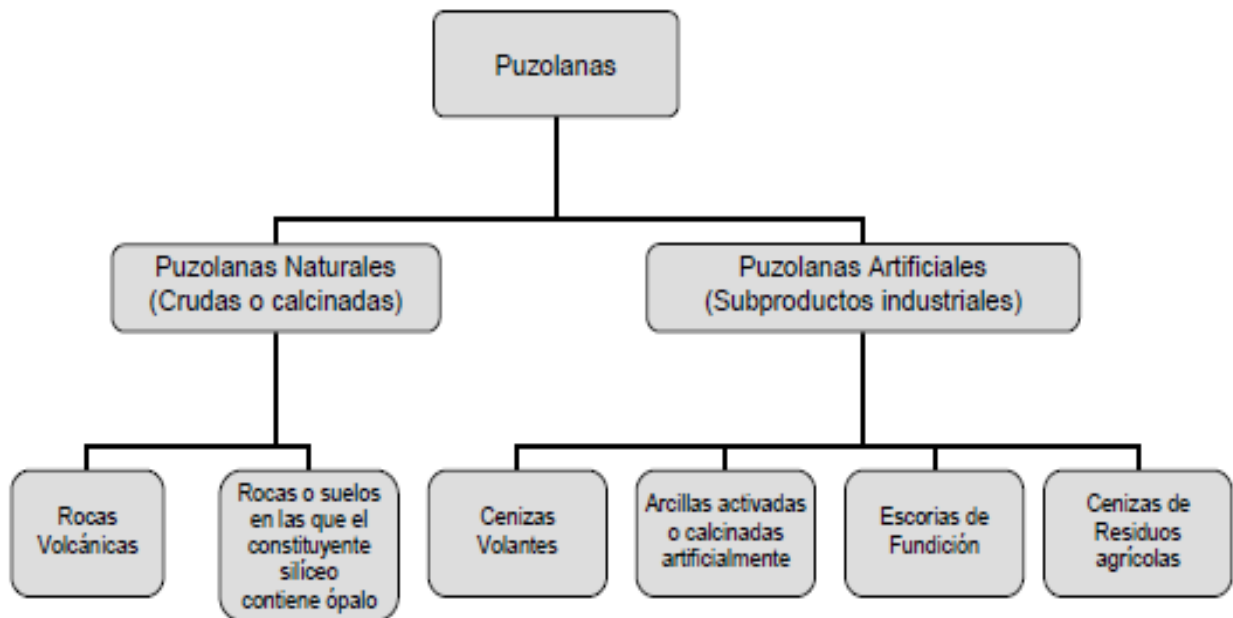
cementante, pero que en forma finamente dividida (molida) y en presencia de humedad reacciona químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias, para formar compuestos que sí poseen propiedades cementantes (Neville, 1999).

Como sabemos, el hidróxido de calcio se forma como uno de los productos de la hidratación del cemento. Este compuesto no tiene valor cementante y es soluble en agua y puede ser lixiviado por filtraciones de agua (Shetty 2008). El uso de cemento Pórtland con puzolanas genera una reacción entre el hidróxido de calcio producido de la hidratación del cemento y el  $\text{SiO}_2$  amorfo de la fase de vidrio del material puzolánico. Esto conduce a un incremento en el hidrato de silicato de calcio, formando gel C-S-H y por lo tanto, incrementa la resistencia y la densidad (Liu et al., 2005).

Los materiales puzolánicos deberán tener un alto grado de superficie específica, además de un gran contenido de sílice amorfa para generar una reacción puzolánica (Velosa y Cachim, 2009).

### *II.3.1 Clasificación de las puzolanas.*

Los materiales que tienen la capacidad necesaria para cumplir con los requisitos de la definición de puzolana son muy numerosos, en la figura 3 estos materiales se clasifican de acuerdo a su origen:



**Fig. 3 Clasificación de las Puzolanas (Hernández, 2007).**

A continuación se describe brevemente la clasificación de las puzolanas de acuerdo a su origen con las que se estarán trabajando en esta investigación:

### *II.3.2 Puzolanas Naturales.*

Rocas Volcánicas. Son aquellas en la que su constituyente amorfo es vidrio producido por enfriamiento brusco de lava. Por ejemplo las cenizas volcánicas, las pómez, las tobas, la escoria y la obsidiana.

### *II.3.3 Puzolanas Artificiales.*

Cenizas de residuos agrícolas. La ceniza de cascarilla de arroz y las cenizas del bagazo y de la paja de la caña de azúcar. Cuando son quemados convenientemente, se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina, cuya estructura depende de la temperatura de combustión (Hernández, 2007).

### *II.3.4 Usos de las puzolanas.*

Como se observó los materiales puzolánicos pueden ser de origen natural o artificial, la mayoría de las puzolanas naturales se deben moler antes de ser usadas y muchas se tienen que calcinar a temperaturas de 650°C a 980°C, para activar sus componentes arcillosos. Estos materiales se clasifican según la norma ASTM C 618 como puzolanas clase N, que es una puzolana



natural cruda o calcinada tales como algunas tierras diatomáceas, horteno opalino y esquistos tobas y cenizas volcánicas o pumíticas que pueden no ser procesadas por calcinación o varios materiales tales como arcillas y esquistos que requieren de calcinación para impartirles propiedades satisfactorias.

Existen dos modos básicos de emplear las puzolanas en el concreto: formando parte de un cemento Pórtland puzolánico o; dosificándolas por separado durante la elaboración de las mezclas. Para el primer caso, el porcentaje en que interviene la puzolana queda sujeto al criterio del fabricante; para el segundo caso se utiliza a los requerimientos particulares de cada obra específica.

De acuerdo con Shetty (2008), el uso de apropiadas puzolanas en cantidades adecuadas, modifican ciertas propiedades de concretos y morteros en estados frescos y endurecidos como las siguientes:

- a) Menor calor de hidratación
- b) Reducción de la reacción álcali-agregado
- c) Mejoramiento de la resistencia contra ataques de sulfatos en los suelos y el agua de mar
- d) Mejora la extensibilidad
- e) Menor susceptibilidad a la disolución y lixiviación
- f) Mejora de la trabajabilidad
- g) Menores costos.

El efecto principal de las puzolanas sobre el concreto endurecido se obtiene por la reacción de éstas con la cal hidratada. Esta reacción aumenta las reacciones a la compresión y a la tensión, disminuye la permeabilidad, reduce la filtración y mejora la resistencia del concreto al ataque de los sulfatos.

El mayor uso de las puzolanas es en estructuras masivas grandes, por ejemplo en la construcción de presas, donde es necesario mantener lo más bajo que se pueda el calor de hidratación; en concretos expuestos a las aguas marinas o al ataque de los sulfatos, y también como inhibidores de los agregados que contienen álcalis. Las puzolanas compuestas por un mayor contenido de sílice mejoran la resistencia que suministran al concreto ante el ataque moderado de los sulfatos. En su mayoría las puzolanas tienen una

acción inhibidora sobre la reacción álcalis-agregados, las que tienen un alto contenido de ópalo son las más efectivas.

Cuando la puzolana es agregada a la mezcla como sustituto de cemento, ayuda a reducir la permeabilidad al agua. El uso más notable de las puzolanas es en las áreas donde su costo es notablemente menor que el del cemento, el uso pertinente como sustituto parcial del cemento tiene como resultado un ahorro en el costo por metro cúbico de concreto. La cantidad a emplear tiene una variación de acuerdo al tipo de puzolana a utilizar, la mezcla, la exposición y otros factores, el rango se encuentra entre un 10% y un 30% de sustitución parcial de cemento (Hernández, 2007).

El efecto sobre la resistencia es muy variable dependiendo del tipo de puzolana utilizada; el desarrollo de esta resistencia es lento es por esto que necesitan un curado más prolongado. En algunas puzolanas la resistencia después de un año es mayor que en un concreto simple.

#### II.4 Puzolanas utilizadas en la investigación

En esta investigación se tomaran las siguientes puzolanas como aditivos para el cemento, esto debido a sus altos contenidos de sílice además de ser materiales de desecho de la industria agrícola.

##### *II.4.1 Cenizas de Cáscara de Arroz (CCA).*

La producción de arroz genera como subproducto la cascara de arroz que corresponde aproximadamente al 23% de su peso inicial. Esta cascara puede ser utilizada como fertilizante en la agricultura o como aditivo para la fabricación de cemento y concreto (Della et al., 2002).

El uso de CCA reactiva como material cementicio suplementario puede conducir a la reducción de emisiones de dióxido de carbono causada por la producción de cemento. También puede mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de concretos. Por otra parte, el reemplazo de cemento por CCA

tiene otra ventaja ambiental: el carbono restante en la ceniza, que puede ser liberado hacia la atmosfera durante largos periodos de almacenamiento, queda atrapado en el concreto (Cordeiro et al., 2004, 2009).

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, la cantidad de arroz (en cascara) producida en el mundo en 2010 fue de más de 700 millones de toneladas. De esta cantidad, cerca del 22% es cascara de arroz, que está compuesta de sílice opalina en combinación con una gran cantidad de un polímero llamado lignina y celulosa (Olivier, 2004). Esto se traduce en más de 154 millones de toneladas de cascara de arroz producidas en 2010.

Cuando la cascara de arroz es incinerada, se genera entre un 17-20% de ceniza, compuesta por cerca de 87-93% de sílice opalina y otras impurezas de óxidos metálicos que dependen de la fuente de la cascara. Estos altos porcentajes de sílice mezclados con fibras vegetales son bastante raros en la naturaleza (Ugheoke y Mamat, 2012).

La CCA es obtenida por medio de la quema de la cascara de arroz, y se ha encontrado que tiene buenas características como material puzolánico. La aplicación de la CCA puede ser tan buena como la del humo de sílice, esto es debido a que la CCA contiene aproximadamente un 85% a un 95% en peso de sílice amorfa. La presencia de la sílice amorfa es benéfica como relleno para mejorar la interfaz de la zona de transición y producir un concreto más denso.

Una aplicación creciente de la cascara de arroz es la de ser utilizada como combustible en la generación de calor para secar el arroz, esto debido a su alto poder calorífico (aproximadamente 16720 kJ/kg). En esta combustión, la CCA es producida. La quema de CCA en aire siempre conduce a la formación de ceniza de sílice, que varía de un color gris a un color negro dependiendo de las impurezas orgánicas y las cantidades de carbono sin quemar (Della et al., 2002).

Los estudios de la CCA para ser usada como puzolana han sido llevados a cabo durante las últimas tres décadas. La mayoría de estos estudios se refieren a cenizas producidas bajo condiciones de quema controladas, con temperaturas específicas, tiempos de quema, velocidad de calentamiento, tipo de horno y condiciones oxidantes. Bajo estas condiciones se produce una puzolana altamente reactiva de color blanco con sílice no cristalino, bajo contenido de carbono y una gran área específica.

Recientemente, una gran cantidad de cascara de arroz ha sido utilizada como combustible para alimentar las calderas de las fabricas modernas de molienda de arroz. Es usada para producir vapor, ya sea para el secado o el precocido de los granos de arroz, o para la producción de electricidad en sistemas de generación. Bajo estos procesos, la CCA generalmente tiene características fisico-químicas diferentes a las que se producen bajo condiciones controladas (Cordeiro, 2006).

La CCA producida bajo condiciones no satisfactorias presenta altos contenidos de carbono y partes de sílice en forma cristalina, lo cual compromete su actividad puzolánica. En este caso, el molido mecánico ultrafino de la CCA puede minimizar el efecto de carbono residual y la presencia de fases cristalinas (Cordeiro et al., 2004, 2009).

Es por esto que este material puede usarse como reemplazo del cemento para buscar obtener un concreto de alta resistencia y de baja permeabilidad que se traduciría en un concreto de alta durabilidad.

Un ejemplo son las investigaciones realizadas en Malasia, resultando que la cascara de arroz, cuando es quemada convenientemente a una temperatura de 500°C se genera una pérdida del 77.1% del peso original de la cascara de arroz y se obtiene un material con propiedades puzolánicas compuesto principalmente por  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  en un 88.54%, este porcentaje cumple con los requerimientos de la ASTM C 618-08a que especifica que el porcentaje debe ser mayor a 70%. Sin embargo el contenido de  $\text{K}_2\text{O}$  es de 5% y de acuerdo con Neville (2004), esta composición química

tendrá un efecto en el desarrollo de resistencia del concreto debido a su reacción con el agregado, se encontró que la sustitución óptima de cemento era de 12%, esto produjo un incremento en la resistencia a los 90 días del 43% (Suraya et al., 2012).

Dado que la durabilidad del concreto se encuentra íntimamente relacionada con su permeabilidad, se demostró que los especímenes sustituidos con 12% de ceniza de cascara de arroz poseen una mejor resistencia a la permeación de agua dentro del concreto, esto debido a la reacción del puzolana por parte de su componente  $\text{SiO}_2$  con el hidróxido de calcio por parte de la hidratación del cemento, esta reacción produce hidrato de silicato de calcio, formando gel C-S-H. El gel actúa llenando los poros en el concreto por lo que da como resultado un concreto de menos permeabilidad (Suraya et al., 2012).

Los resultados de otras investigaciones señalan que la sustitución de CCA por cemento Pórtland puede llegar a ser hasta del 30% sin que se produzcan afectaciones en su resistencia a compresión. Además de que se ha verificado que el porcentaje óptimo de sustitución es de 20%, arrojando como resultado un incremento de alrededor de 20% de la resistencia a compresión del cemento. En estos resultados también se apreció una mejoría en la estabilidad química y la durabilidad del cemento cuando se le añade CCA, por lo que puede ser factible su utilización en elementos sometidos a ambientes agresivos (Águila, 2001).

Dado que la cascara de arroz es un material de desecho de la industria agrícola se espera contribuir a la conservación del ambiente aprovechando este desperdicio para utilizarlo en la industria de la construcción permitiendo la reducción de costos en la producción de concreto, además de incrementar la vida útil del mismo mediante la reducción de su permeabilidad.

Cabe señalar que este es solo uno de los materiales con los que se piensa trabajar en esta investigación, ya que el otro es la ceniza de bagazo de

caña de azúcar, con propiedades similares a las de la cascara de arroz además de ser también un desecho de la industria agrícola.

#### *II.4.2 Ceniza de Bagazo de Caña de azúcar (CBC).*

La razón por la cual se utilizara esta ceniza como material con características puzolánicas para sustituir parcialmente la cantidad de cemento es por su alto contenido de los óxidos fundamentales: Silicio ( $\text{SiO}_2$ ), Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y Fierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que sobresalen en un 70% de la composición química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC).

Investigaciones recientes a nivel mundial, efectuadas en países como la India, Brasil y Cuba, han demostrado la posibilidad de utilizar la CBC como un compuesto que se le adiciona al cemento Pórtland, con la finalidad de mejorar sus propiedades físicas y químicas del concreto, sustituyendo en un determinado porcentaje el contenido de cemento con CBC en morteros y en concretos sin afectar su resistencia. En México existen 54 ingenios azucareros en operación, los cuales se localizan en 15 estados, la producción en el ciclo 2011-2012 fue de 46.231 millones de toneladas de caña, por cada tonelada de caña aproximadamente el 28% es bagazo, y de éste, entre el 2% y 4% es ceniza. En la actualidad este residuo es considerado un desperdicio y solamente es aprovechado como abono o fertilizante.

En 2003 aproximadamente el 95% del bagazo de caña de azúcar producido en Brasil fue quemado para generar energía resultando en dos millones de toneladas de ceniza como residuo. Debido a la presencia de sílice amorfa en este material Cordeiro et al. (2004, 2009) lo propuso como ingrediente en la mezcla de cemento. Por lo tanto, para mejorar su actividad puzolánica de este residuo es necesario incrementar la finura del material, con el fin de aumentar la superficie específica y la reactividad de la ceniza. Para moler el material se utilizó una máquina de los ángeles, donde se introdujeron 18 litros de ceniza y los tiempos de molienda fueron 8, 15, 30, 60, 120 y 240 minutos. El material utilizado fue el que pasó la malla no. 325 ( $45\mu\text{m}$ ), de manera que se encontró que después de 60 min de molienda todas las

partículas son menores a 40µm. Por lo tanto, mientras más es el tiempo de molienda se incrementa la superficie específica. Entonces, con 15 minutos de molienda se obtuvo el índice puzolánico requerido por normas brasileñas. Las muestras con 60 y 120 min de molienda presentaron un índice puzolánico de 89% y 100%.

Tiempo después, en Tailandia, Rukzon y Chindaprasirt (2011) utilizaron la ceniza del bagazo de la caña de azúcar proveniente de los molinos de azúcar donde el bagazo es utilizado como combustible, mas sin embargo la ceniza del bagazo es considerada un desperdicio ya que no se le ha encontrado algún uso práctico por lo que causa un problema. Entonces ellos utilizaron la ceniza en reemplazo del cemento Pórtland en porcentajes de 10, 20 y 30 %, de modo que demostraron que la sustitución de 10% era la optima para obtener una mayor resistencia y una ligera mejora en la permeabilidad que la del cemento Pórtland.

Algunos estudios hechos en los efectos físicos y mecánicos del concreto endurecido con sustitución parcial de cemento por ceniza de bagazo como los realizados por Ganesan et al. (2007), han demostrado que la ceniza de bagazo fue una efectiva mezcla mineral, con una sustitución optima del 20%.

La ceniza es un residuo inorgánico que queda después de quemar el carbón en horno de mufla cuya temperatura final esta comprendida entre 700°C y 750°C; está integrada en su mayor parte por compuestos de sílice, alúmina, calcio y hierro junto con cantidades mínimas de magnesio, titanio, sodio y potasio. Aunque los constituyentes son óxidos, se presentan sobretodo como una mezcla de silicatos, óxidos y sulfatos con minúsculas cantidades de otros elementos. Los silicatos tienen su origen en la pizarra y en los minerales de arcilla; el óxido de hierro deriva principalmente de las piritas, las cuales se queman y producen el óxido de férrico y óxidos de azufre; los óxidos de calcio y de magnesio, resultan de la descomposición de los carbonatos minerales; los sulfatos son formados en su mayor parte por la interacción de los carbonatos minerales pirita y oxígeno.

La composición de la ceniza varía según la variedad de la caña y edad, el tipo de suelo y la cantidad de fertilizantes. La cantidad de ceniza en el bagazo depende en gran medida de la cantidad de tierra (suelo), que como material extraño, se haya recogido durante la cosecha, la cantidad de tierra se afecta por la altura de las cuchillas por encima de la tierra y por las condiciones atmosféricas, es decir, si el tiempo es seco o húmedo. Las cantidades normales de ceniza en condiciones de poca lluvia son entre el 2% y el 4% del bagazo total (Hernández, 2007).

#### *II.4.3 Piedra pómez.*

La piedra pómez, por sus condiciones naturales de formación en la naturaleza, contiene compuestos químicos y minerales muy importantes que definitivamente pueden interactuar con el cemento Pórtland, uno de los compuestos químicos más importantes es el  $\text{SiO}_2$  (sílice), en donde se ha presentado contenido de 73.6% en algunas muestras de pómez, así como también el mineral ópalo, el cual es un mineral muy reactivo con los compuestos químicos principales del cemento Pórtland.

La ventaja que presenta con respecto a otros materiales de construcción es que éste no necesita de ningún proceso sofisticado que lleve a la culminación del mismo.

Hanifi Binici (2007), utilizó las puzolanas naturales de la que es rica Turquía, la piedra pómez. Primero mezcló en el cemento diferentes tipos de piedra pómez, encontrando una con los mejores resultados Osmaniye. Sus ensayos consistieron en agregar este material al concreto para después pasarlos por un baño de una sustancia llamada PUMCO utilizada como recubrimiento para prevenir la corrosión. Después de curar su espécimen por 28 días, los sumergió en una solución  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  al 5% durante dos años, luego al tercer año la solución concentrada al 10%. Este espécimen mostró gran resistencia ante el ataque de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , ya que al cabo de 36 meses su pérdida de masa fue de 3% mientras que en la mezcla de control fue de 16%.



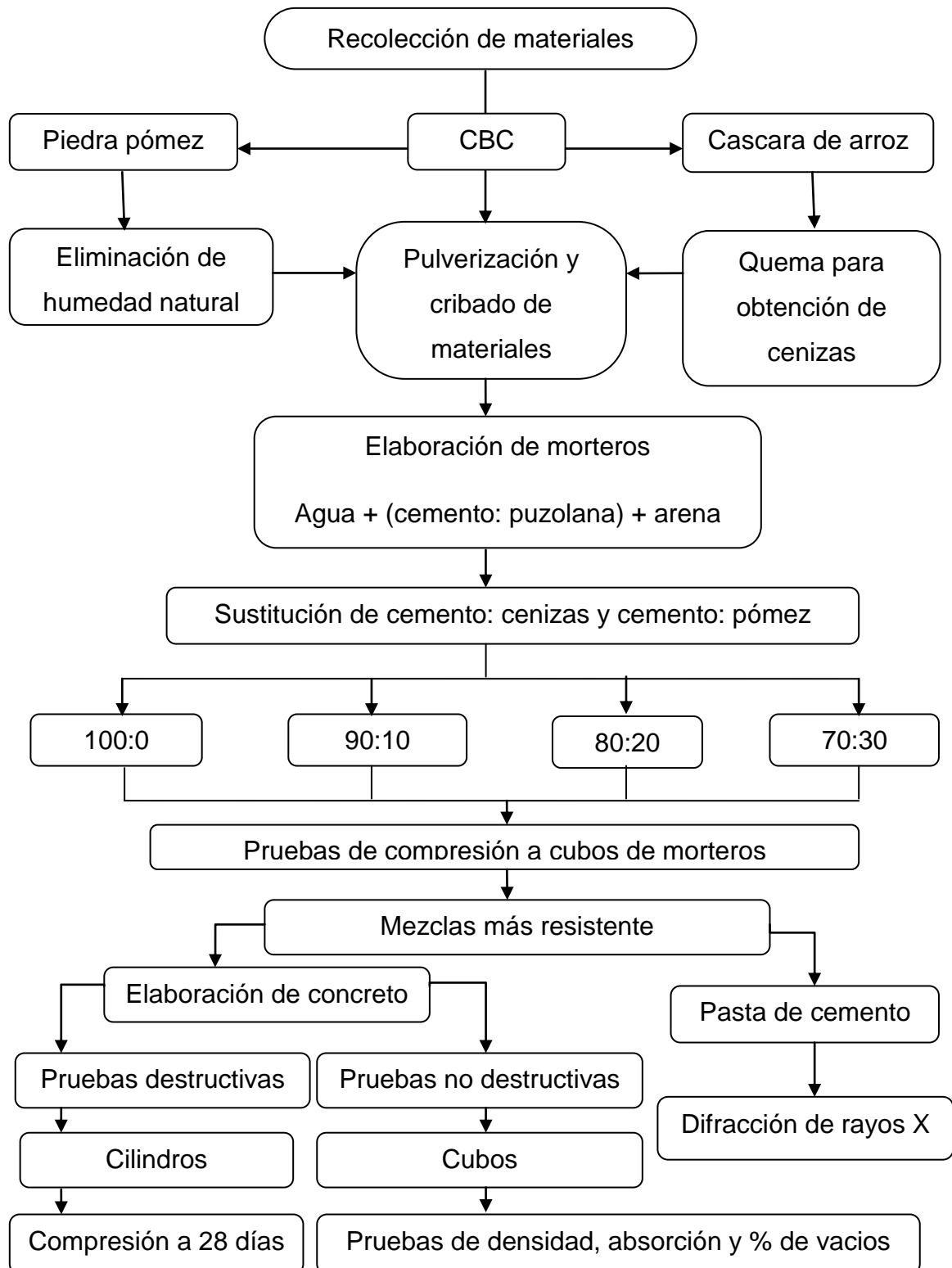
La reacción entre el cemento Pórtland y la piedra pómez produce hidrosilicato de calcio ( $m\text{CaO} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) en forma de paneles y portlandita ( $(3-m)\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) en forma de grumos. Según la literatura podemos decir que los cristales que proporcionan un endurecimiento y aumento en la resistencia a la compresión son los hidrosilicatos de calcio ( $m\text{CaO} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ), y lo contrario ocurre con los cristales de portlandita, los cuales contribuyen a disminuir la resistencia.

Otro tipo de microestructura presente en este material son las etringitas que son cristales de forma dendrítica, definidos como monosulfoaluminatos de calcio  $[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6][0.5(\text{SO}_4) \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$ , los cuales se desarrollan en la parte más porosa del compuesto, esto se debe a que, los iones de sulfuro o sulfato se difunden a través de los intersticios, hasta las zonas más porosas en donde terminan por desarrollarse con los iones de calcio presentes en la muestra, estos cristales tienen lugar, debido a la presencia de azufre en el cemento, sin embargo, representa una muy pequeña cantidad del mismo en el cemento. Estos cristales también disminuyen la resistencia a compresión, ya que son indicadores, como mencionamos anteriormente, de la presencia de porosidad en el medio.

La muestra de cemento+pómez en porcentaje de 60% y 40% respectivamente presentó mejores resultados mecánicos que los arrojados por un cemento Pórtland, ya que la presencia de cristales de hidrosilicatos de calcio, son más abundantes que los de portlandita y de etringitas y esto da como resultado un mejor comportamiento mecánico (Hernández, 2012).

### III. METODOLOGÍA

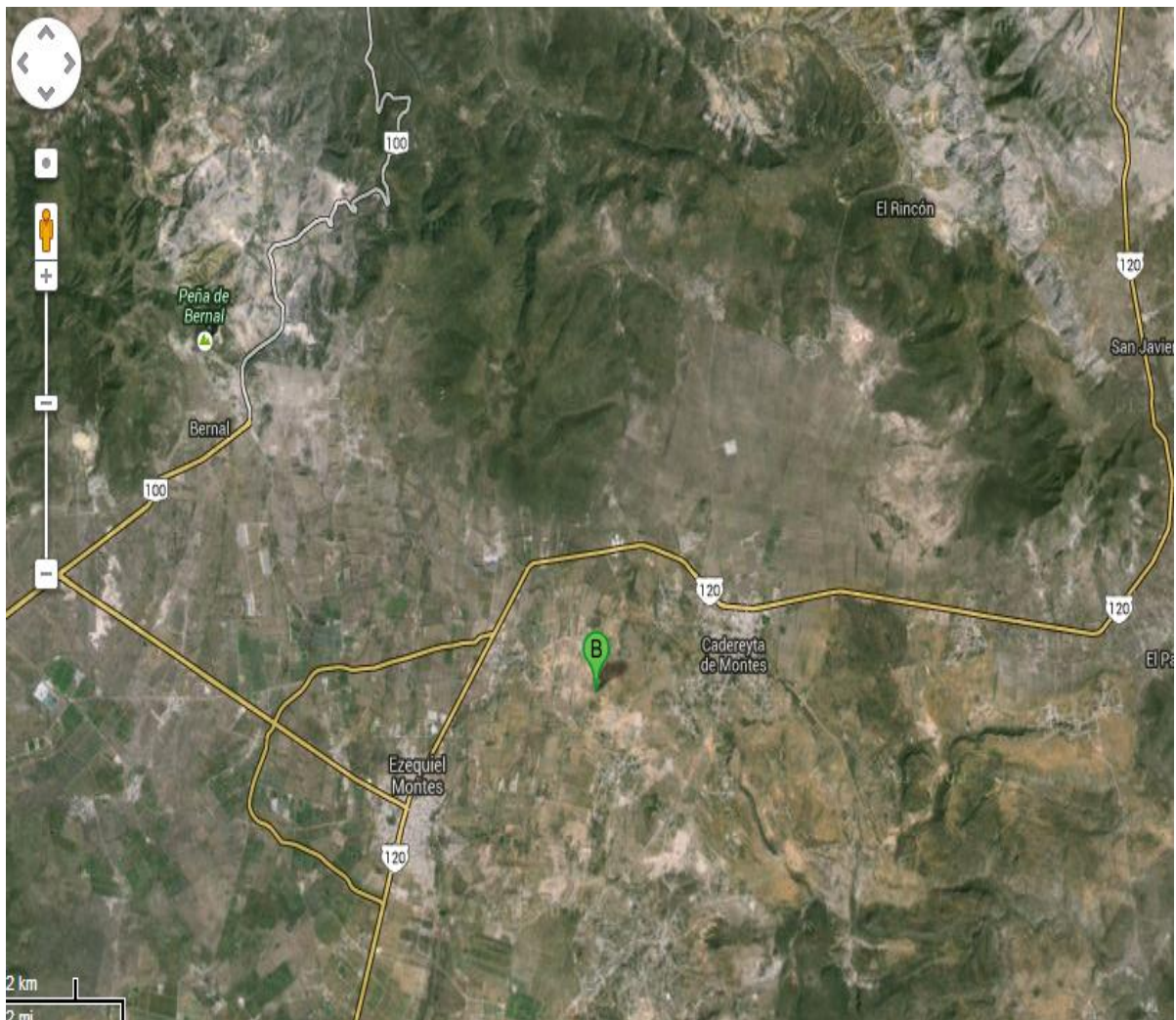
En el siguiente diagrama se muestran los pasos seguidos que permitieron el desarrollo de esta investigación desde su inicio hasta la etapa de experimentación.



### III.1. Materiales utilizados para la sustitución parcial de cemento

#### *III.1.1 Piedra pómez*

Este material fue obtenido del municipio de Cadereyta de Montes en el estado de Querétaro. En la figura 4 se muestra la ubicación del banco de material del cual se realizó la recolección, este se localiza entre los municipios de Cadereyta de Montes y Ezequiel Montes.

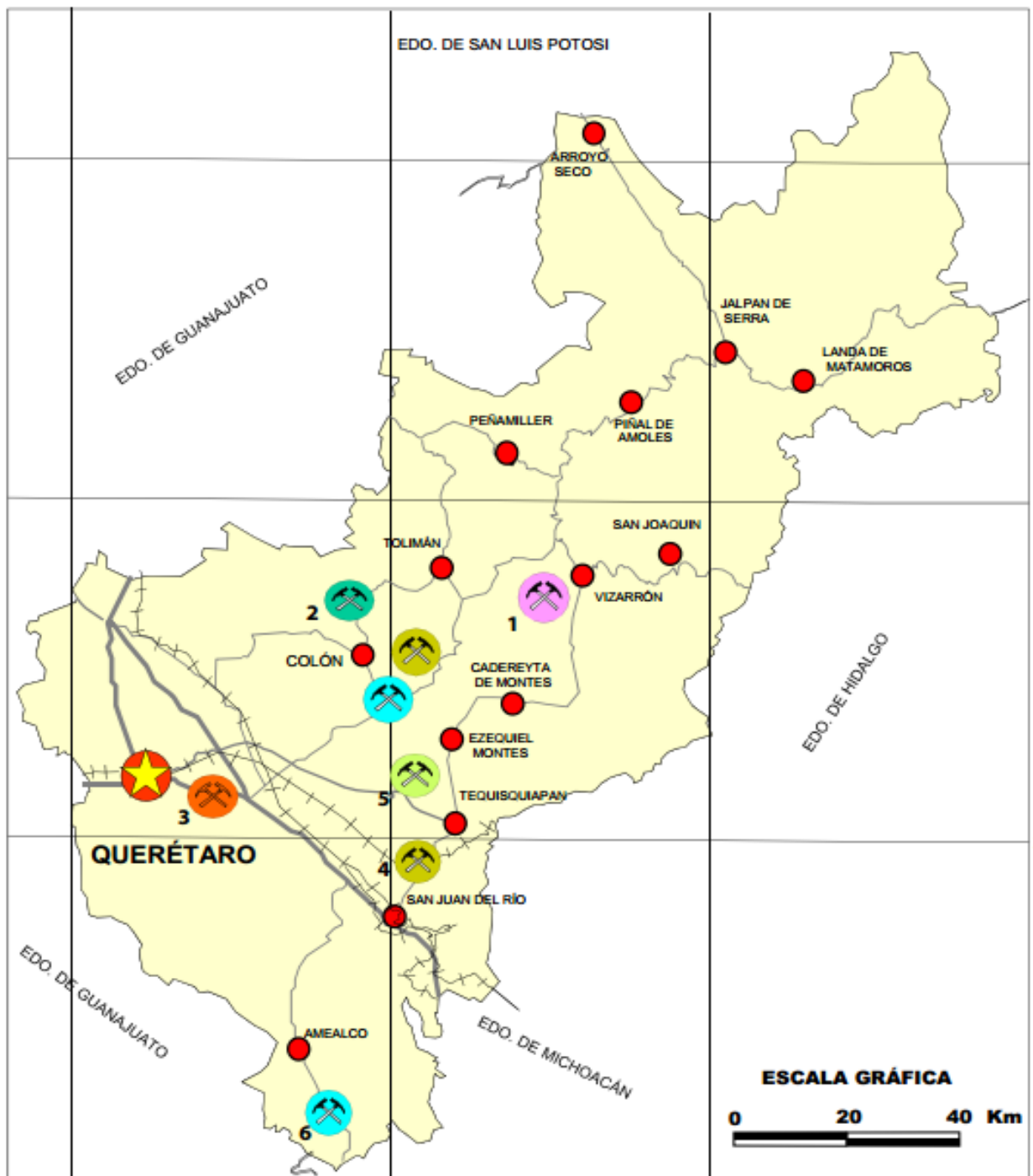


**Fig. 4 Localización del banco de material donde se extrajo la piedra pómez en el estado de Querétaro.**

Este material fue seleccionado ya que en la región existe una amplia explotación por parte del sector minero de diferentes tipos de materiales utilizados en la construcción. Por lo que se pensó dar un diferente uso a este

material conocido en la región como arenilla y que es comúnmente utilizado para rellenos en azoteas. Los suelos de esta región datan del periodo terciario y corresponden a suelos con toba riolítica – toba dacítica y conglomerados polimíctico – arenisca, además de basalto (SGM, 2014).

Cerca del lugar de recolección se encuentran algunas minas que se dedican a la extracción de diferentes tipos de sustancias. En la figura 5 se presenta el mapa del estado de Querétaro con algunos de los distritos mineros no metálicos más importantes de la región.



EXPLICACIÓN		
LOCALIDAD	SUBSTANCIA	
1.- VIZARRÓN	Mármol	Capital del Estado
2.- SAN ANTONIO	Caliza	Ciudad
3.- LA CAÑADA	Rocas dimensionables	Autopista
4.- TEQUISQUIAPAN	Ópalo	Carretera
5.- EZEQUIEL MONTES	Caolín	
6.- AMEALCO	Sillar (tobas)	

Fig. 5 Panorama minero del estado de Querétaro.



Una vez que se arribó al lugar de explotación, se pudo observar que existían diferentes capas de material que se diferenciaban por su color, alternándose en estratos de aproximadamente dos metros de espesor. Una de las capas contenía al material en color azul, mientras que la otra capa almacenaba un material de color café claro como se muestra en la figura 6.



**Fig. 6 Banco de material donde se extrajo la piedra pómez.**

El material que fue recolectado para la investigación procede de una de las capas de color azul que se encuentran en la parte inferior de la mina. En la figura 7 se aprecia el estrato de donde se recolecto la muestra.



**Fig. 7 Estrato de aproximadamente 1.5m a 2m compuesto de piedra pómez donde se recolecto el material.**

Una vez tomadas las muestras, fue necesario colocar el material a secar para su posterior proceso de pulverización, por lo que primero fue dejado al aire libre para que perdiera su humedad natural y después se introdujo al horno de secado durante 24 h para eliminar la humedad restante que contenían, esto debido a que la máquina de pulverización no procesa de buena manera el material si este se encuentra húmedo debido a que las partículas empiezan a adherirse a los discos del pulverizador y no permite la entrada de mas materia. En la figura 8 se muestra el material colocado en una charola para dejar que se seque al aire libre.





**Fig. 8 Piedra pómez colocada en charola con humedad natural para posteriormente introducirla al horno de secado.**



### III.1.2 Ceniza de Bagazo de Caña de azúcar (CBC)

El material estudiado se obtuvo en el estado de Veracruz, la figura 9 muestra la ubicación del ingenio azucarero de Mahuixtlán, donde se realizó el muestreo, ubicado a 16 km de la ciudad de Xalapa, por la carretera Xalapa – Coatepec, vía Las Trancas.



**Fig. 9 Localización del ingenio azucarero donde se recolectó la ceniza de bagazo de caña de azúcar CBC.**

El abastecimiento de la caña al ingenio Mahuixtlán es proporcionado por ejidatarios y pequeños propietarios en un 95% y un 5% respectivamente. Con corte manual en un 100%, se tiene conocimiento que el 46% de la superficie se riega por sistema rodado (gravedad) y en el resto de la superficie el riego es de temporal. La superficie para abastecer de caña al ingenio es de 3,180 hectáreas, las cuales se encuentran entre 600 m.s.n.m y hasta 1,100 m.s.n.m, Predominan las tierras arcillo-arenosas, franco-arenosas y las arcillas (Hernández, 2007).

El proceso de producción de azúcar es muy complejo; inicia con la preparación del terreno, etapa previa de la siembra de la caña, una vez que la planta madura entre los 12 y 14 meses, las personas encargadas de la tarea de

la cosecha se disponen a cortarla y recogerla a través de alce mecánico, para transportarla hasta los patios de caña de los ingenios azucareros, una vez en los patios se hacen muestreos para determinar las características de calidad y el contenido de sacarosa, fibra y nivel de impurezas, luego se pesa en básculas y se conduce a los patios donde temporalmente se almacena, de ahí pasa a las mesas de lavado de caña para dirigirla a una banda transportadora que las conduce para su picado. Las picadoras son unos ejes colocados sobre los conductores accionados por turbinas, provistos de cuchillas giratorias que cortan los tallos y los convierten en astillas, dándoles un tamaño uniforme para facilitar así la extracción del jugo en los molinos. Una vez que la caña ha sido preparada por las picadoras llega a un tándem de molinos, constituido cada uno de ellos por tres o cuatro mazas metálicas y mediante presión extrae el jugo de la caña. Cada molino está equipado con una turbina de alta presión. En el recorrido de la caña por el molino se agrega agua, generalmente caliente para extraer al máximo la sacarosa que contiene el material fibroso. Este proceso de extracción es llamado maceración. El bagazo que sale de la última unidad de molienda se conduce a una bagacera para que seque y luego se va a las calderas como combustible, produciendo el vapor de alta presión que se emplea en las turbinas de los molinos.

El bagazo es un material fibroso considerado como residuo sólido, suele contener del 40% al 50% de humedad, éste residuo se quema casi de la misma manera que los desperdicios de madera. En ocasiones se le adiciona combustible suplementario para mantener la combustión continua y para proporcionar energía con el fin de eliminar la humedad. El bagazo generalmente puede satisfacer todos los requerimientos de combustible de un ingenio azucarero. Un análisis representativo del bagazo seco es de 44.47% de carbón (C), 6.35% de hidrógeno (H), 49.7% de oxígeno (O). y 1.4% por ciento de ceniza (Rodríguez, 2005).

Las cenizas que se estudiaron en esta investigación, fueron muestreadas de la caldera bagacera número dos. La cual es una caldera Babcock Wilcox que está diseñada para alimentarla con combustóleo y/o bagazo. Actualmente solo opera mediante bagazo. Su capacidad nominal es de

3,248 caballos caldera. El horno es del tipo Ward, al cual se le suministra aire caliente lateralmente y por abajo mediante una placa con rejillas.

El sitio donde se realizó el muestreo de las cenizas, fue en los ceniceros y en las tolvas y ciclones, tal como se indica en las figuras 10 y 11 respectivamente.



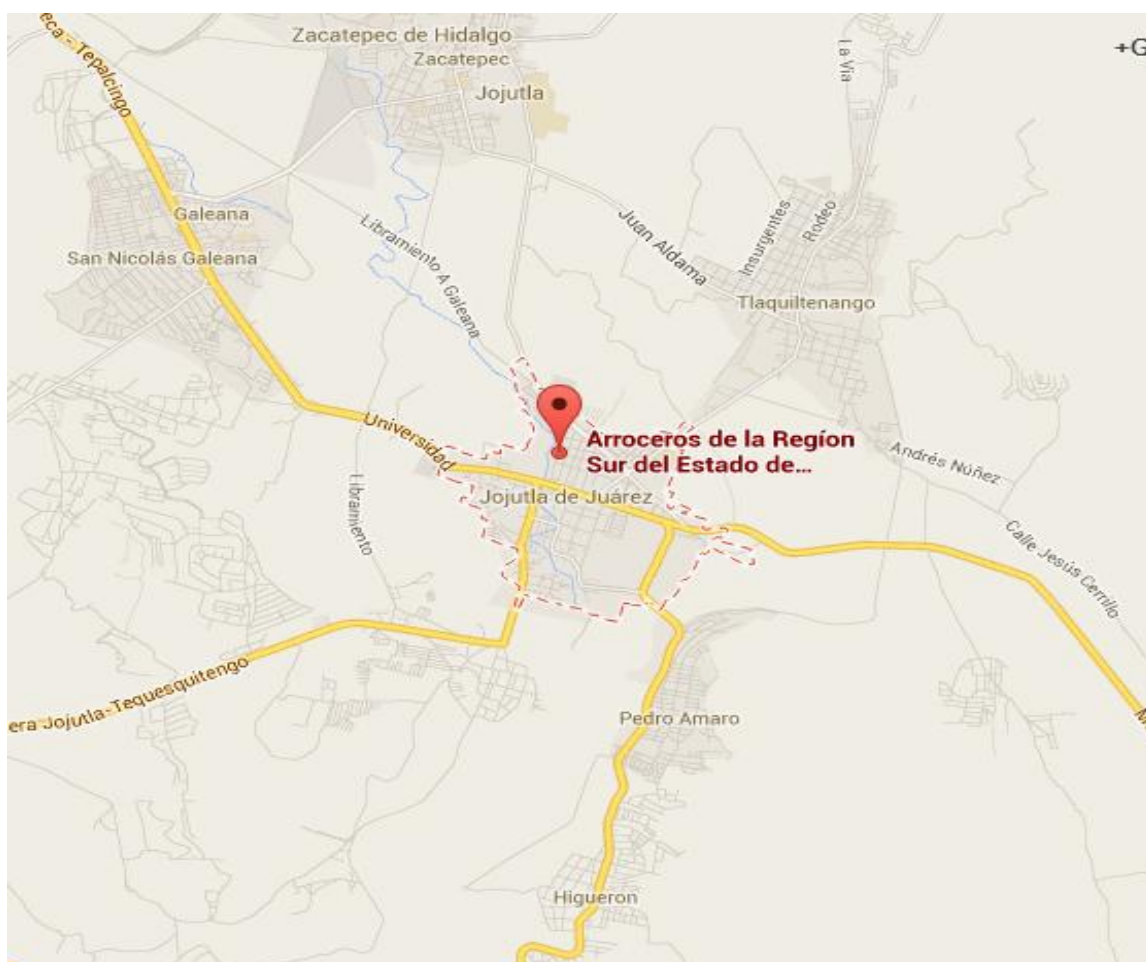
**Fig. 10 Ceniceros de la caldera bagacera número dos.**



**Fig. 11 Tolvas y ciclones de la caldera bagacera número dos.**

### III.1.3 Cascara de arroz

Este material fue obtenido en el estado de Morelos, uno de los principales productores de arroz en México, para el año de 2012 se estimó una producción de 9 mil toneladas de arroz. La variedad de arroz de la que se obtuvo la cascara fue de la conocida como A70, producida por la arrocera San José, en la figura 12 se aprecia la ubicación de esta empresa en el municipio de Jojutla.



**Fig. 12 Ubicación geográfica de la arrocera San José.**

Esta variedad de arroz fue obtenida en 1970 bajo el nombre de Morelos A-70, misma que tuvo una buena adopción por los productores y en corto tiempo desplazó a todos los ecotipos de arroz cultivados todavía en la época. La calidad del arroz Morelos es reconocida con un sobreprecio en el

mercado en relación a los demás arroces, nacionales o importados (SAGAR, 1998).

Morelos A-70 fijó lo que hoy se conoce como arroz “calidad Morelos” consistente en un grano alargado y oblongo, de dimensiones mayores que las de cualquier otro tipo, y con una mancha yesosa característica en la región ventral del grano, conocida comúnmente como “panza blanca”, en la figura 13 se muestra el tipo de cascara de arroz que se tomó del lugar.



**Fig. 13 Cascara de arroz recolectado proveniente del tipo de arroz A70.**

Tras la liberación de Morelos A-70 los estudios agronómicos se intensificaron. En primer lugar se regionalizaron las zonas productoras de arroz, quedando divididas en “zona baja”, en alturas menores a 1,000 msnm y “zona alta”, en alturas superiores a 1,000 msnm. La regionalización se basó en diferencias de clima, suelo, y cultivos en rotación, entre las dos zonas. El



rendimiento medio de esta planta es de 6 ton/ha y el municipio de Jojutla se ubica en la zona baja (SAGAR, 1998).

#### *III.1.4 Quema de la cascara de arroz para obtención de cenizas*

Este método consistió en incinerar la cascara de arroz con ayuda de un horno crematorio ubicado en la ciudad de San Miguel de Allende. Este horno que se muestra en la figura 14, es alimentado por gas, esta hecho de mampostería y consta de una puerta automática al frente que permite la entrada de los cuerpos para su posterior cremación. La llama principal que alimenta al horno se encuentra en la parte inferior del horno, aunque esta llama empieza a funcionar después de que el horno ha sido calentado por otro sistema de flamas. Una de las características que tiene este dispositivo es la de poder controlar la temperatura en su interior por medio de un indicador existente en su parte frontal.



**Fig. 14 Horno crematorio utilizado para incinerar la cascara de arroz ubicado en la ciudad de San Miguel de Allende, Guanajuato.**

Se realizaron dos periodos de quema. En cada ronda se introdujo la cascara de arroz contenida en un costal y fue acomodada de tal forma que la llama principal estuviese en contacto directo con el material.

El proceso de quema demoro alrededor de 15 minutos, a una temperatura no mayor de 500°C. En la figura 15 se aprecia el horno en funcionamiento, ya que cada 5 min el material era removido con ayuda de palas para producir una quema los más uniformemente posible.



**Fig. 15 Proceso de incineración de la cascara de arroz, horno trabajando con el quemador principal.**

Terminado el proceso de quema, el material fue colocado en carretillas para que fuese ventilado y tuviera una temperatura a la que pudiera ser manipulado.

Se introdujeron dos costales con material de cascara de arroz y terminado el proceso de quema solo se obtuvo alrededor de medio costal con

ceniza de cascara de arroz, cada costal tenía un peso aproximado de 8,720 kg y se pudo obtener 4,130 kg de ceniza de la quema de los dos costales. Por lo tanto el porcentaje de ceniza obtenida producto de la quema de CCA es de 23.68%. El tipo de ceniza que se obtuvo estaba compuesto en su mayoría por una ceniza de color oscura con algunas tonalidades en color gris como se puede apreciar en la figura 16.



**Fig. 16 Muestra del tipo de ceniza de cascara de arroz obtenida después del proceso de quema.**



### III.2. Material Inerte (Arena de Rio)

La arena utilizada para la elaboración de mortero y de concreto fue extraída de rio, proveniente del poblado de La Cieneguita, ubicado en San Miguel de Allende, Guanajuato, la composición física de la arena puede ser apreciada en la figura 17.



**Fig. 17 Arena extraída de rio sin cribar.**

La arena fue tamizada y se utilizó solo el material que pasó a través de la malla no. 30 y se retuvo en la malla no. 60, este material posee características similares a la arena de Ottawa, es decir con alto contenido de sílice (ASTM C 91, 1995), en la figura 18 se muestra el proceso de cribado de la arena y



**Fig. 18** Proceso de criba de la arena entre las mallas no. 30 y 60.

En la figura 19 se aprecia la arena que se obtuvo al final del proceso de cribado y con la que se trabajo en la investigación para realizar las mezclas de mortero y concreto.



**Fig. 19** Arena que pasa por la malla no. 30 y se retiene en la malla no. 60.

### III.2.1 Humedad de la arena

La arena se encontraba con cierta humedad por lo que se procedió a secar el material durante 24 h en el horno, después se realizó la prueba del cono de arena para conocer el porcentaje de absorción que esta tenía y no influyera en la relaciones de agua/cemento con las que se trabajó. La figura 20 muestra el equipo utilizado para la prueba del cono de arena.



**Fig. 20 Prueba del cono de arena, material saturado siendo secado parcialmente.**

Para la corrección por la absorción de la arena se tomaron 500 gr de arena en condición saturada y superficialmente seca y se obtuvo el porcentaje de absorción de acuerdo con la formula

$$\% \text{ absorcion} = \frac{W_s - W_d}{W_d} * 100$$

Donde

$W_s$  = peso en condición saturada y superficialmente seco

$W_d$  = peso seco del material

Referencia

NMX-C-165-ONNCCE-2004.



El porcentaje de absorción fue igual a 3.83%. La figura 21 muestra la parte en la que se alcanza la condición necesaria de la prueba del cono de arena, así como los 500 gr tomados en esta condición para determinar la absorción.



**Fig. 21 Prueba del cono de arena, del lado izquierdo material en condición saturado y superficialmente seco. Del lado derecho 500 gr de material en dicha condición para ser introducido al horno durante 24 h.**

### III.3. Pulverización de los materiales

La finura y el área específica de una ceniza es un requisito indispensable que se debe cumplir para poder reaccionar en presencia de humedad. Al producir partículas más finas se obtiene una mayor área superficial que influye en la velocidad con la que un material con características puzolánicas adquiere mayor resistencia en corto tiempo o a edad temprana.

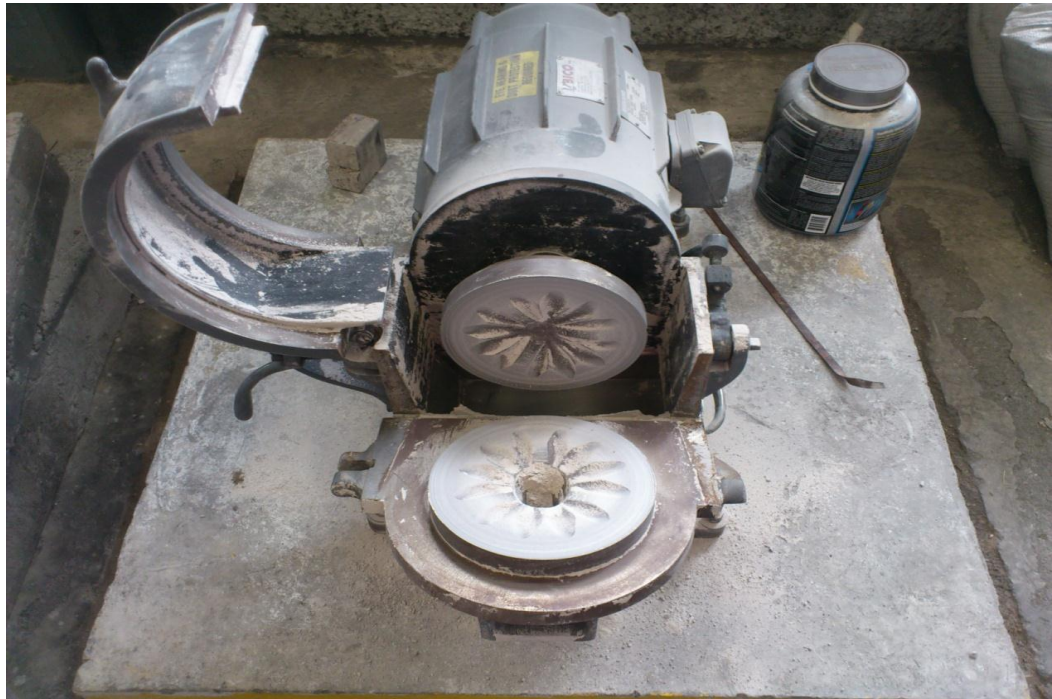
Para poder obtener el tamaño de partícula más pequeño que fuese posible, todos los materiales fueron pulverizados con la ayuda de un equipo del tipo ua pulverizer de la marca Bico, propiedad del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), en la figura 22 se muestra la maquina mencionada.



**Fig. 22 Máquina para pulverización del material.**

. Este dispositivo consta de un par de discos que trabajan en un rango de 900 a 1000 rpm y pulveriza el material seco de hasta  $\frac{1}{4}$ " y lo reduce a un polvo fino que va de los tamaños de malla 150 a 200, con una capacidad de procesamiento de 1 Lb/min (basado en cuarzo). Los discos de molienda del

dispositivo pueden ser ajustados al tamaño de partícula que se requiera. Estos discos se pueden apreciar en la figura 23 donde la maquina se encuentra abierta.



**Fig. 23 Interior de la maquina pulverizadora donde se aprecian los discos donde el material es procesado.**



### III.4. Cribado del material de investigación

Una vez que los materiales fueron pulverizados se procedió a cribarlos a través de malla no. 200 para trabajar con el material que paso a través de dicha malla. En la figura 24 se muestra la malla no. 200 con su fondo y tapa respectivos.



**Fig. 24 Cribado en seco de los materiales a través de la malla no. 200.**

El método de criba se realizó en seco, empezando por la piedra pómez sin presentarse dificultades mayores para lograr un buen porcentaje de material que pasa por la malla no. 200. Para el caso de las cenizas, el proceso de criba necesitaba una mayor energía además de que se despedían varias partículas en forma de polvo muy finas por lo que se procedió a utilizar una máquina tamizadora de control para cribar propiedad del IMT.

En la figura 25 se muestra el tamizador de control en proceso de criba de las cenizas.



**Fig. 25 Criba de los materiales por medio de tamizador de control.**



### III.5. Métodos de pruebas

#### *III.5.1 Cemento Pórtland*

Se decidió utilizar el cemento Cruz Azul tipo II compuesto (CPC 30R RS), que es un cemento Pórtland compuesto de alta resistencia inicial y resistente a los sulfatos.

#### *III.5.2 Elaboración de mezclas*

Para poder evaluar el rendimiento de las mezclas, se elaboraron cubos de mortero de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE-2006, la cual determina la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos.

En una primera etapa se empezó a trabajar con mezclas de mortero, realizando sustituciones de cemento con cada material de investigación en porcentajes de 10, 20 y 30%, en esta fase solo se evaluó la resistencia a compresión de cada mezcla comparándola con la mezcla de control para así poder determinar cuál de estos materiales es el más conveniente para realizar las pruebas en mezclas de concreto. La tabla 3.1 muestra el número de especímenes de mortero realizados con cada material, el porcentaje de sustitución de las mezclas y la edad a la que fueron evaluados.

**Tabla 3.1 Número de especímenes realizados y porcentajes de sustitución en diferentes mezclas de mortero**

Material de Sustitución	Mezclas	Relación (cemento: material de sustitución)	Edad en días				
			7	14	28	60	100
<b>Cemento</b>	Control	100:0	3	3	3	3	3
<b>Piedra Pómez</b>	Serie A	90 :10	3	3	3	3	3
	Serie B	80 : 20	3	3	3	3	3
	Serie C	70 : 30	3	3	3	3	3
<b>Ceniza de bagazo de caña de azúcar</b>	Serie A	90 :10	0	0	3	3	3
	Serie B	80 : 20	0	0	3	3	3
	Serie C	70 : 30	0	0	3	3	3
<b>Ceniza de cascara de arroz</b>	Serie A	90 :10	0	0	3	3	3
	Serie B	80 : 20	0	0	3	3	3
	Serie C	70 : 30	0	0	3	3	3

La norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE-2006 indica que el número de especímenes para cada edad especificada de prueba debe de ser tres como mínimo.

Las mezclas de mortero consistieron en 1 parte de cemento por 2.75 partes de arena con una relación de agua cemento (a/c) de 0.6. Las sustituciones fueron hechas con cada material de acuerdo al peso del cemento en porcentajes de 10, 20 y 30%. Las mezclas fueron proporcionadas como se muestra en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Proporciones de agregados para elaboración de especímenes de mortero**

Nombre	Sustitución %	Cemento g	Sustitución g	Arena g	a/c = 0.6		No. Cubos
					Agua mL	Absorción mL	
<b>Control</b>	0	600	0	1650	360	63.195	9
<b>10%</b>	10	540	60	1650	360	63.195	9
<b>20%</b>	20	480	120	1650	360	63.195	9
<b>30%</b>	30	420	180	1650	360	63.195	9

La tabla 3.2 nos indica que para realizar 9 cubos de mortero de control, se requieren 1650 g de arena y 600 g de cemento, para que la relación a/c sea igual a 0.6 es necesario agregar 360 mL de agua mas 63,195 mL adicionales para corregir la absorción de la arena y no afectar a la relación agua/cemento.

Las primeras sustituciones se realizaron con la piedra pómez, por lo que para lograr hacer 9 cubos de mortero con una sustitución del 10% solo se modificó el contenido del peso de cemento pasando de 600 g de cemento, utilizados en la mezcla de control, a solo 540 g de cemento mas 60 g de piedra pómez. Esta metodología fue utilizada para las siguientes sustituciones de 20 y 30% con todos los materiales de investigación.

En la figura 26 se aprecia el proceso de mezcla de los materiales antes de incorporar agua, del lado izquierdo los materiales son colocados en la charola y del lado derecho se empieza el proceso de mezclado.



**Fig. 26** A la izquierda material sin mezclar para elaboración de mortero. A la derecha material revuelto para obtener una mezcla homogénea.

El material fue mezclado en una charola con ayuda de una espátula hasta obtener una mezcla totalmente homogénea como se muestra en la figura 27.



**Fig. 27** Material totalmente homogenizado con ayuda de una espátula.

El agua utilizada en las mezclas de mortero fue agua potable apta para consumo humano o agua de garrafón, esto con el afán de no incluir agua de la red que pudiese contener porcentajes de cloro y así reducir al mínimo las variables que existieran en el procedimiento.

### *III.5.3. Elaboración de probetas*

Una vez hechas las mezclas de mortero se procedió a llenar los moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas (ASTM C 109M, 2002), que previamente fueron cubiertos con aceite para facilitar el paso de desmolde. Una vez que se llenaron los moldes fueron introducidos en la cámara de curado del laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro, se dejaron curar durante 24 h para después ser desmoldados, marcarlos y volver a colocar los cubos en la cámara de curado como se muestra en la figura 28. Cabe señalar que los cubos no fueron curados bajo agua ya que la cámara de curado cuenta con un humidificador.



**Fig. 28 Cubos de mortero y moldes con mezcla en la cámara de curado.**



Debido a que el material de CCA era de un color negro intenso, se podían diferenciar fácilmente que tipo de material de sustitución tenían los cubos, aunque entre los cubos de control y sustitución de CBC no era tan visible el cambio de color entre uno y otro, en la figura 29 se muestran los cubos agrupados de acuerdo a su composición.



**Fig. 29** En la parte izquierda cubos con sustitución de CCA, en el centro cubos de control (sin sustitución) y en la parte derecha cubos con sustitución de CBC.

#### *III.5.4. Elaboración de cilindros de concreto*

Una vez analizadas las mezclas de mortero mediante su resistencia a la compresión se determinó la mejor mezcla que sobrepasó a la mezcla de control, y se procedió a la realización de concreto para su análisis de resistencia a compresión, densidad, absorción y porcentaje de vacíos.

El análisis de las mezclas de concreto solo se realizó a edades de 28 días, por lo que solo se diseñó la mezcla de control y la mezcla con sustitución parcial de cemento por CCA en un porcentaje de 20%, en la tabla 3.3 se muestran las proporciones utilizadas en estas mezclas.

Las mezclas se diseñaron con el método del ACI con los siguientes valores:

Revenimiento 75-100 mm

Resistencia 30 MPa

Tamaño máximo de agregado grueso 9.5 mm

Relación agua/cemento 0.54

**Tabla 3.3 Proporciones para pruebas en concreto a 28 días**

Concreto	Cemento (kg)	CCA sustitución 20% (kg)	Agua (kg)	Agregado (kg)	
				Fino	Grueso
<b>Control</b>	422.22	0	250.46	697.7	874.66
<b>CCA</b>	337.78	84.44	250.46	697.7	874.66

En la figura 30 se muestran los agregados ya pesados necesarios para la realización del concreto.



**Fig. 30 Agregados para realizar mezcla de concreto y molde para verificar revenimiento.**

Una vez pesados los materiales en las cantidades requeridas para el volumen de los cilindros a utilizar, se procedió a realizar la mezcla mediante medios manuales, esto debido a la poca cantidad de concreto a realizar. La mezcla se realizó sobre una charola metálica y se realizó el mezclado con ayuda de una cuchara de albañil como se muestra en la figura 31.



**Fig. 31 Del lado izquierdo materiales para mezcla de concreto sin sustitución, del lado derecho mezcla de concreto con 20% de sustitución de CCA.**



Los cilindros utilizados para las pruebas de compresión son cilindros con 10 cm. de radio y 20 cm de altura. En la figura 32 se muestra el llenado de los moldes, donde el primer paso fue recubrirlos con aceite, después se procedió a llenar los moldes en 3 capas de aproximadamente igual volumen. Cada capa se compactó con 25 penetraciones de la varilla punta de bala, empezando cerca del perímetro y después avanzando en espiral hacia el centro. Después de terminar la compactación de la última capa, se enrasa el concreto mediante un movimiento de rodamiento de la varilla.



**Fig. 32 Moldeado de cilindros de concreto.**

Además de realizar cilindros de concreto para las pruebas de compresión, también se realizaron cubos de concreto para pruebas no destructivas como las de absorción y porcentaje de vacíos.

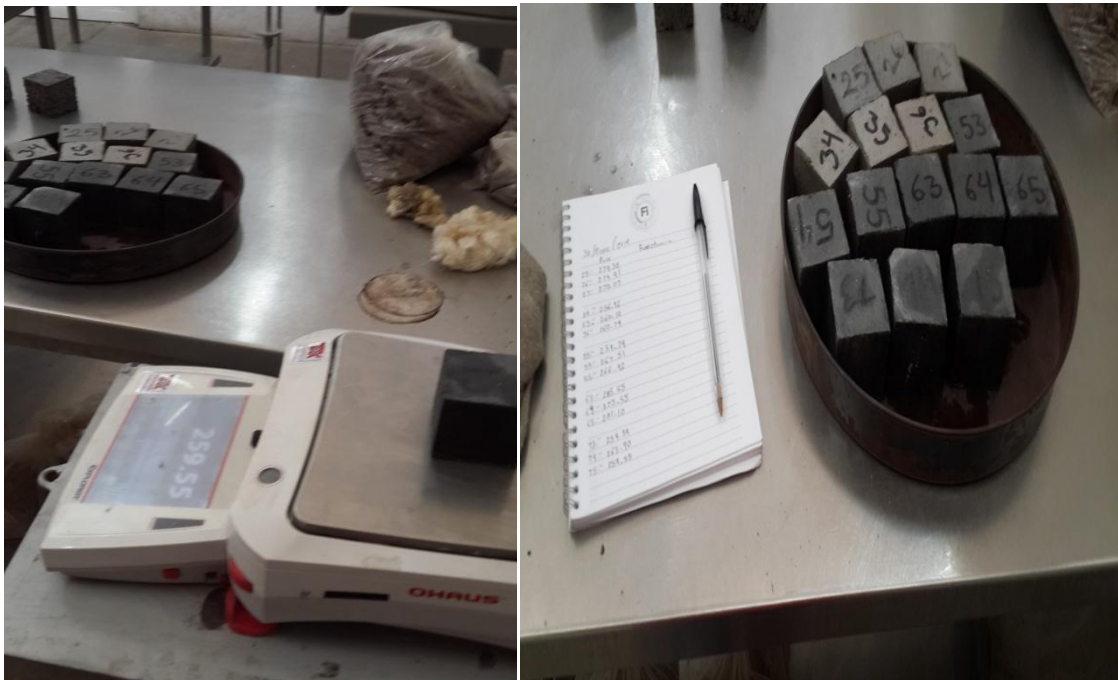
Después de transcurrir el tiempo necesario para fraguar del concreto (24 horas) se descimbraron los cilindros y los moldes para cubos, se marcaron y se transportaron al cuarto de curado para su inmersión en agua como se muestra en la figura 33, los especímenes permanecieron sumergidos hasta el día de sus pruebas (ASTM C 511, 2003).



**Fig. 33 Cilindros de concreto inmersos en agua.**

### *III.5.5. Determinación de resistencia a compresión*

Las pruebas de compresión para los cubos de mortero se realizaron con la ayuda de la máquina universal Tinius Olsen. Al cumplir la edad de prueba los cubos fueron extraídos del cuarto de curado y se procedió a pesarlos inmediatamente, como se muestra en la figura 34, para después ser llevados a la máquina de pruebas.



**Fig. 34 Determinación del peso de los especímenes antes de evaluar su resistencia a compresión.**

Los cubos fueron colocados en la máquina de pruebas añadiendo una capa de arena en la parte superior para así garantizar una carga uniforme sobre el cubo en caso de que este tuviese alguna irregularidad en la superficie. En la figura 35 se muestra como fueron colocados los cubos para ser probados.



**Fig. 35 Cubos de mortero colocados en maquina universal para prueba de compresión.**

Para empezar la prueba de compresión se ajusta la platina de prueba con el cubo y se empieza a aplicar la carga a una velocidad constante hasta producir la falla. Los resultados son arrojados en kg.f que más tarde deberán ser traducidos a  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . La maquina muestra en su display el incremento de carga constante, aunque cuando se producen las primeras fisuras en los especímenes los valores empiezan a descender y después vuelven a recuperarse los valores hasta llegar al punto en donde ya no se puede aplicar mas carga y empieza el descenso de manera dramática en el display. Se probaron 3 especímenes por cada sustitución hecha para obtener un promedio y poder realizar las graficas correspondientes de resistencia a la compresión contra edad del espécimen.

Cuando terminó la etapa de prueba se tomaron fotos de los cubos fallados como se muestran en la figura 36.



**Fig. 36 Diferentes tipos de fallas presentes en los morteros.**

Las pruebas de compresión realizadas al concreto se realizaron en la maquina universal del laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro. Cuando se cumplieron los 28 días de curado del concreto, los especímenes fueron extraídos y secados superficialmente para eliminar el exceso de agua, los cilindros fueron pesados en la báscula como se muestra en la figura 37 y después fueron dejados al aire libre por un par de horas para lograr que secan superficialmente y poder cabecearlos con azufre.





**Fig. 37 Determinación del peso de los cilindros de concreto después de ser extraídos del proceso de curado.**

Para el cabeceo con azufre se emplearon platos metálicos que se pueden apreciar en la figura 38, donde primero se preparó el mortero de azufre para su empleo, calentándolo a  $140 \pm 10^\circ\text{C}$ .



**Fig. 38 A la izquierda preparación de azufre, a la derecha cilindros parcialmente cabeceados.**

Una vez terminado el proceso de cabeceo de los cilindros, fueron llevados a la máquina de pruebas para su destrucción. Los cilindros fueron cuidadosamente colocados en las marcas que contiene la base de la máquina como se aprecia en la figura 39, esto con el fin de centrar la carga sobre el cilindro. En este dispositivo se registra la carga máxima que resiste el cilindro en unidades de kN.



**Fig. 39 Cilindro colocado en la maquina universal en espera de aplicación de carga.**

Los primeros cilindros que se probaron fueron los de control para conocer el rango en el que se esperaba que no sobrepasen los demás cilindros.





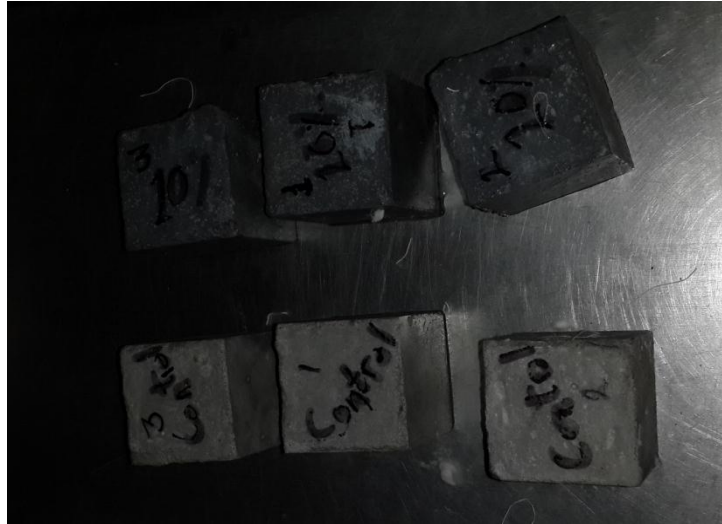
**Fig. 40 Fallas ocurridas en los cilindros de control.**



**Fig. 41 Fallas ocurridas en los cilindros con 20% de sustitución de CCA.**

### *III.5.6. Densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido*

Para la realización de estas pruebas se basó en la norma ASTM C 642-06, se tomaron los cubos de concreto mostrados en la figura 42, curados en inmersión de agua a 28 días.



**Fig. 42 Cubos de concreto utilizados para pruebas de densidad, absorción y porcentaje de vacíos.**

Masa secada al horno. El primer paso después de sacarlos del proceso de curado fue secarlos superficialmente y obtener su peso, después se introdujeron durante 48 h de secado en el horno como lo muestra la figura 43, a una temperatura de 100 a 110°C. Una vez cumplido el periodo de tiempo especificado se retiraron las muestras del horno y se pesaron designando a estos valores como A.



**Fig. 43 Cubos de concreto ingresando al horno para periodo de secado.**

Masa saturada después de inmersión. El siguiente paso fue sumergir los cubos en agua por un periodo no menor a 48 h, después de este tiempo se registro su peso como el valor B.

Masa saturada después de ebullición. Después de estar sumergidos, se colocaron los cubos en un recipiente y se cubrieron de agua para hervirlos durante 5 h como se aprecia en la figura 44. Terminado este periodo se dejaron reposar por 16 h a temperatura de 20°C en la cámara de temperatura constante, después se procedió a secar la humedad superficial con una toalla y se registro su peso como el valor C.



**Fig. 44** Del lado izquierdo se muestran los cubos recién colocados al fuego, del lado derecho se muestran los cubos en ebullición para obtener el valor C de la norma ASTM C 642-06.

Masa inmersa aparente. Por último se pesaron los cubos sumergidos en agua y se determinó a este valor D, este proceso se muestra en la figura 45.



**Fig. 45** Determinación del peso sumergido de los cubos de concreto.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### IV.1. Sustituciones en morteros

Los primeros resultados que se presentan son las sustituciones con la piedra pómez, incluyendo las resistencias de la mezcla de control.

Se realizaron 3 cubos de mortero por cada mezcla para cada edad, evaluando a 28, 60 y 100 días. En la primera sustitución realizada con la piedra pómez se evaluaron resultados a edades de 7, 14 y 28 días, siendo estos resultados muy pobres comparados con la mezcla de control por lo que se decidió probar la resistencia de las siguientes mezclas de material a edades más tardías empezando en 28 días y terminando las pruebas a 100 días.

**Tabla 4.1 Resistencia a compresión kg.f sustitución con piedra pómez**

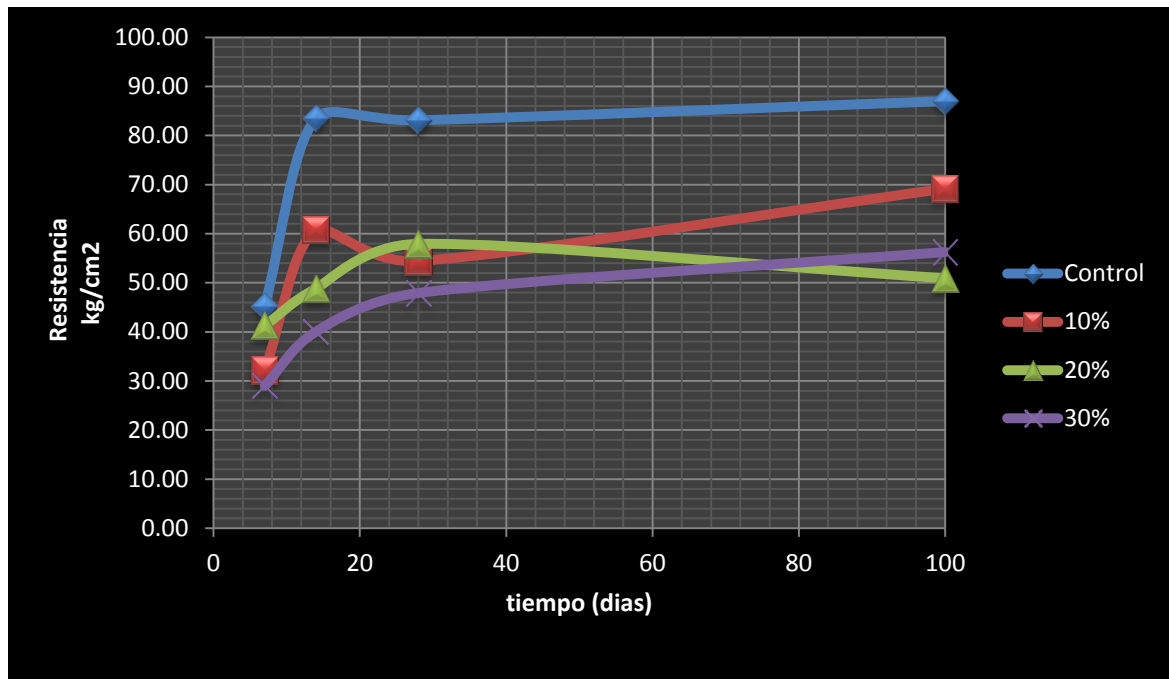
Edad	Control	10%	20%	30%
<b>7</b>	1132.0	802.7	1032.1	724.3
<b>14</b>	2089.5	1518.2	1220.2	1000.6
<b>28</b>	2077.3	1360.8	1448.2	1198.1
<b>100</b>	2175.4	1729.5	1272.9	1406.7

**Tabla 4.2 Resistencia a compresión kg/cm<sup>2</sup> sustitución con piedra pómez**

Edad	Control	10%	20%	30%
<b>7</b>	45.28	32.11	41.28	28.97
<b>14</b>	83.58	60.73	48.81	40.02
<b>28</b>	83.09	54.43	57.93	47.93
<b>100</b>	87.02	69.18	50.92	56.27



A continuación se muestra la figura 46 donde se observa cómo va evolucionando la resistencia a través del tiempo comparando la mezcla de control con las mezclas con sustitución parcial de cemento por piedra pómez.



**Fig. 46 Resistencia a compresión vs tiempo, sustitución con piedra pómez**

Se puede apreciar que la única mezcla que se acerca a la línea de control es la del 10%, sin embargo, solo se acerca cuando el tiempo de curado es de 100 días y no llega a tener la misma resistencia que la mezcla de control, su resistencia es de 79.49% con respecto al control. Las siguientes mezclas de 10 y 20% se encuentran muy por debajo de datos deseables para poder seguir trabajando con ellas.



La tabla 4.3 y 4.4 muestra los datos de la resistencia de las mezclas de mortero con sustitución de bagazo de caña de azúcar.

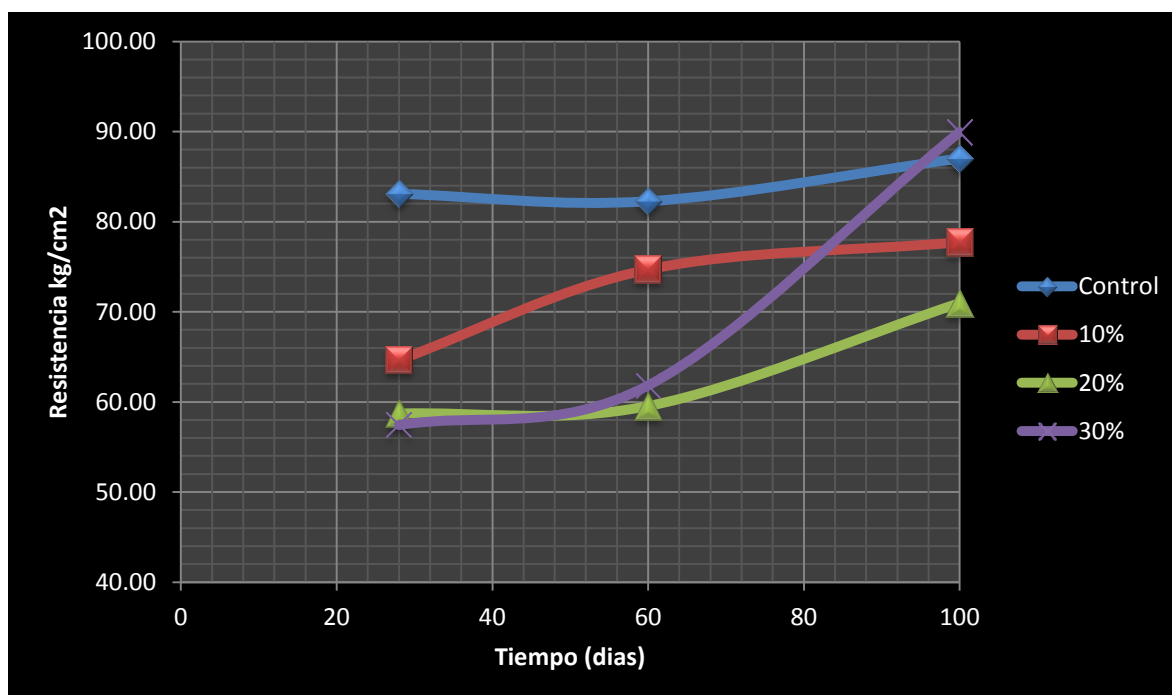
**Tabla 4.3 Resistencia a compresión kg.f sustitución con CBC**

Edad	Control	10%	20%	30%
28	2077.3	1616.4	1467.77	1435.8
60	2056.8	1867.4	1488.63	1545.8
100	2175.4	1943.1	1774.3	2248.9

**Tabla 4.4 Resistencia a compresión kg/cm<sup>2</sup> sustitución con CBC**

Edad	Control	10%	20%	30%
28	83.09	64.66	58.71	57.43
60	82.27	74.69	59.55	61.83
100	87.02	77.72	70.97	89.96

Las graficas obtenidas con estos datos son las siguientes:



**Fig. 47 Resistencia a compresión vs tiempo, sustitución con CBC**

En la figura 47 se aprecia que la mezcla con una sustitución de 10% de CBC a 60 días, los resultados de compresión son mayores a los alcanzados por la mejor mezcla de pómez a 100 días. Aunque hay que señalar que aun no se alcanza la resistencia a la compresión dada por la mezcla de control. La máxima resistencia alcanzada en promedio por la mezcla de 10% de sustitución a 100 días es de  $77.72 \text{ kg/cm}^2$  lo que equivale a un 89.3% de la resistencia alcanzada por la mezcla de control a la misma edad.

El mejor porcentaje de sustitución con CBC resultó ser la mezcla de 30%, superando en resistencia a la compresión a edad de 100 días a la mezcla de control con un promedio de  $89.96 \text{ kg/cm}^2$  equivalente a un 3.37% mayor a la mezcla de control, aunque su resistencia a 60 días se encuentra muy por debajo del control, a esta edad la mezcla tiene un 75% de resistencia que la mostrada por el control.

Cabe señalar que todas las sustituciones con CBC incrementan su valor de resistencia conforme evoluciona el tiempo, incluso la mezcla con peores resultados que es la del 20% se encuentra por encima del valor alcanzado por la mejor mezcla con sustitución de piedra pómez.

A continuación se muestran las tablas 4.5 y 4.6 que describen los resultados obtenidos con las mezclas de sustitución de ceniza de cascara de arroz:

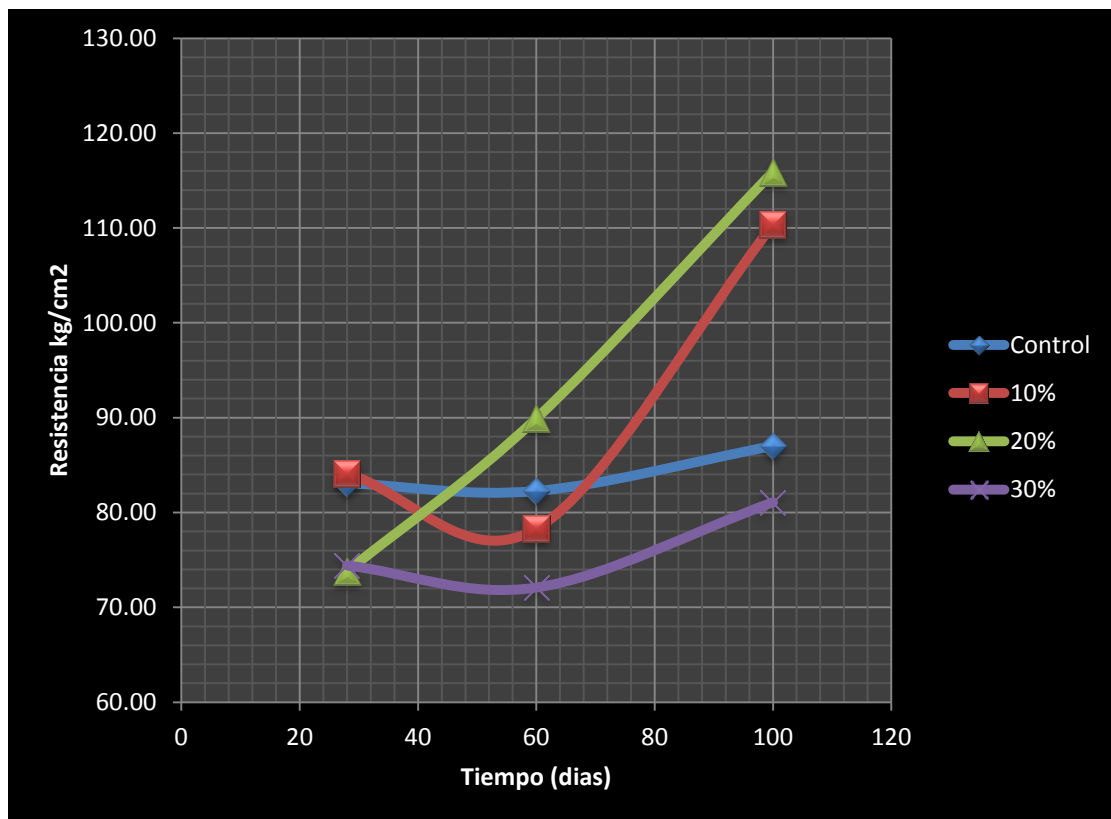
**Tabla 4.5 Resistencia a compresión kg.f sustitución con CCA**

Edad	Control	10%	20%	30%
28	2077.3	2102.7	1844.77	1860.4
60	2056.8	1957.3	2248.00	1802.3
100	2175.4	2758.7	2897.6	2027.0

**Tabla 4.6 Resistencia a compresión kg/cm<sup>2</sup> sustitución con CCA**

Edad	Control	10%	20%	30%
28	83.09	84.11	73.79	74.42
60	82.27	78.29	89.92	72.09
100	87.02	110.35	115.90	81.08

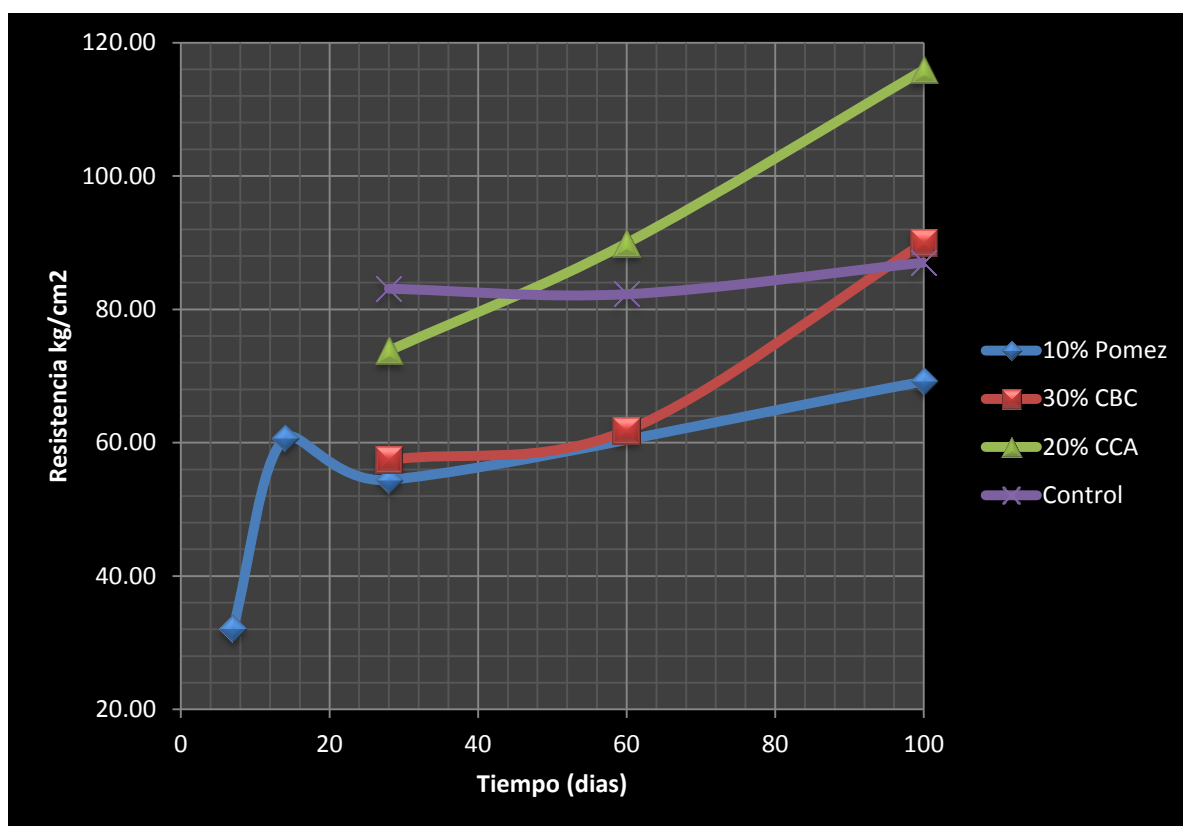
La figura 48 muestra los resultados a compresión de las diferentes sustituciones comparadas contra la muestra de control:



**Fig. 48 Resistencia a compresión vs tiempo, sustitución con CCA**

Con estos resultados se observó que la mejor sustitución con este material es la del 20%, ya que a los 60 días de curado ha superado a la muestra de control en un 9.29%. En las sustituciones restantes se presentó un descenso en la resistencia que habían alcanzado a los 28 días.

En la figura 49 se presentan las mejores sustituciones de cada material que obtuvieron mayor resistencia, estas mezclas fueron la sustitución con un 10% de piedra pómez, 30% de CBC y 20% de CCA.



**Fig. 49 Resistencia a compresión vs tiempo de mejores mezclas, 10% pómez, 30% CBC y 20% CCA**

En la figura 49 se aprecia cómo es que la mejor sustitución resultó ser la combinación con CCA, a los 28 días está ligeramente por debajo de la resistencia del control, además de mantenerse constante en aumento en la evolución de resistencia con respecto al tiempo. Aunque hay que resaltar que con la CBC se nota un crecimiento acelerado de resistencia a partir de los 60 días de curado. Por otra parte, la resistencia del control se mantiene estable

desde los 28 hasta los 60 días de curado, aunque empieza a tener un incremento muy leve que no es muy significativo a partir de este punto. La mezcla con sustitución de pómez tiene una resistencia muy baja con respecto al control, a los 100 días apenas ha alcanzado el 79.49% de la resistencia de la muestra de control, por lo que resultó ser la mezcla con peor desempeño ya que además de tardar demasiado en adquirir la resistencia, el porcentaje de sustitución fue apenas del 10%.

#### IV.2 Sustituciones en concreto

Dado que la evaluación de la resistencia en el concreto solo se realizó a una edad de 28 días, no es posible construir una grafica que permita apreciar el desarrollo de la resistencia o los puntos de inflexión de la curva representada por las variables resistencia vs edad, por lo que los resultados son expresados mediante la tabla 4.7.

**Tabla 4.7 Resultados de resistencia del concreto con sustitución de 20% de cemento Pórtland por CCA**

Tipo de mezcla	Etiqueta	Peso g	Resistencia			
			(kN)	ton	kg/cm <sup>2</sup>	MPa
<b>Control</b>	Control	3800	254.1	25910.58	329903.71	32.35
	14-may	3630	249.081	25398.79	323387.43	31.71
<b>CCA</b>	1	3680	237.139	24181.06	307882.87	30.19
	2	3630	255.906	26094.73	332248.48	32.58

Área de cilindro de concreto: 78.539 cm<sup>2</sup>.

El concreto fue diseñado para 30 MPa por lo que se puede apreciar que la dosificación de los materiales, así como la cantidad de agua y cemento utilizados fueron las correctas. También se aprecia que los valores de

resistencia entre el control y la sustitución de CCA son muy parecidos a la edad de 28 días, por lo que esta combinación puede sustituir al cemento sin tener efectos negativos en el desarrollo de resistencia a edades tempranas.

La resistencia del cemento Pórtland a los 28 días es casi la máxima que desarrollara durante su periodo de servicio, mientras que la sustitución de CCA seguirá incrementando su valor de resistencia conforme avance el tiempo como ya se ha demostrado en las pruebas de mortero. Además el poder llegar a sustituir una cantidad tan grande de cemento como el 20% es un gran aporte desde el punto de vista económico y ecológico.

#### IV.3 Densidad, absorción y porcentaje de vacios en concreto

En la tabla 4.8 y 4.9 se muestran los resultados de las pruebas de densidad, se puede apreciar que el porcentaje de vacios es más constante en las muestras de control, ya que en la CCA varían un poco más los valores, esto puede llegar a reducirse conforme avance el tiempo y la puzolana siga reaccionando con el hidróxido de calcio formando mayor cantidad de gel C-S-H que permita llenar los vacios en el concreto (Liu et al., 2005).

**Tabla 4.8 Resultados de norma ASTM C 642-06**

Cálculos	No. Cubo	Valor A g	Valor B g	Valor C g	Valor D g	Absorción después de inmersión %	Absorción después de inmersión y cocido %
<b>Control</b>	1	279.9	303.44	303.61	172.32	8.41	8.47
	2	276.55	300.93	300.95	169.44	8.82	8.82
	3	272.79	296.13	296.39	168.02	8.56	8.65
<b>CCA</b>	1	273.89	300.69	301.1	167.98	9.78	9.93
	2	278.37	303.08	303.14	171.62	8.88	8.90
	3	277.89	302.95	303.05	171.14	9.02	9.05



**Tabla 4.9 Resultados de norma ASTM C 642-06 (continuación)**

Cálculos	No. Cubo	Densidad seca g/cm <sup>3</sup>	Densidad después de inmersión g/cm <sup>3</sup>	Densidad después de inmersión y cocido g/cm <sup>3</sup>	Densidad Aparente g/cm <sup>3</sup>	Volumen de espacio permeable poroso (vacíos) %
<b>Control</b>	1	2.132	2.311	2.313	2.602	18.06
	2	2.103	2.288	2.288	2.582	18.55
	3	2.125	2.307	2.309	2.604	18.38
<b>CCA</b>	1	2.057	2.259	2.262	2.586	20.44
	2	2.117	2.304	2.305	2.608	18.83
	3	2.107	2.297	2.297	2.603	19.07

Valor A. Masa secada al horno.

Valor B. Masa saturada después de inmersión.

Valor C. Masa saturada después de ebullición.

Valor D. Masa inmersa aparente.

En la tabla 4.9 se muestran los resultados del volumen de vacíos de las muestras, esta parte es muy importante debido a que si se logra reducir el volumen de vacíos en el concreto, los agentes que atacan al mismo, como lo son los sulfatos no tendrán manera de ingresar en el concreto o de depositarse y empezar a provocar un ablandamiento de la matriz de la pasta o provocar un aumento en la porosidad. Los resultados en la muestra de control son valores más constantes que en la muestra con sustitución de 20% de CCA, esto puede deberse a varios factores, como lo es una mala compactación del concreto a la hora de colocarlo o simplemente una reacción más lenta por parte de la CCA a la edad de 28 días para formar el gel C-S-H encargado de proveer resistencia y de llenar los vacíos en el concreto, esto se puede verificar en las pruebas de resistencia a compresión, ya que a los 28 días la resistencia de la CCA era un poco menor que la de control. Se espera que conforme avanza el tiempo de curado el valor de vacíos se reduzca debido a la formación de una mayor

cantidad de gel C-S-H, tal como se demuestra en las pruebas de resistencia a compresión.

#### IV.4 Difracción de rayos x

Para las pruebas con difracción de rayos x, se elaboró una pasta de cemento, CCA y agua. Para esta prueba solo se evaluó la mezcla con la que se obtuvieron los mejores resultados de resistencia, siendo esta la sustitución del 20% de CCA.

Para la elaboración de la pasta, se utilizó un molde para pruebas de contracción de suelos, en la figura 50 se muestra el equipo utilizado.



**Fig. 50** Equipo utilizado para la elaboración de pasta de cemento y sustitución de CCA

El primer paso fue colocar un poco de aceite en el molde para facilitar la extracción de la pasta cuando esta endureciera. Una vez pesadas las cantidades de cemento y CCA, fueron colocadas en un recipiente para su mezclado y después agregar la cantidad necesaria de agua para lograr una relación agua/cemento de 0.4. Las cantidades utilizadas fueron:

Cemento Pórtland 32g

CCA 8g

Agua 16ml + 2mL

Se decidió agregar 2 ml más de agua para corregir por la absorción de la CCA, ya que la pasta no tenía una buena trabajabilidad y consistencia. En la figura 51 se muestra el molde con la pasta recién colocada lista para ser introducida al cuarto de curado.



**Fig. 51 Pasta de cemento con sustitución de CCA colocada en molde para contracción**

Cuando se requirió la pasta para su análisis esta fue molida con la ayuda de un mortero de porcelana, para después ser tamizada por la malla no. 200 y tomar una muestra del material que paso por dicha malla para llevarlo a su análisis, este proceso se muestra en la figura 52.



**Fig. 52 A la izquierda molienda de la pasta de cemento mediante un mortero de porcelana, a la derecha malla no. 200**

El análisis de DRX fue llevado a cabo en el laboratorio de difracción de rayos X del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM campus Juriquilla, a cargo del Dr. Eric M. Rivera Muñoz y de la Dra. Beatriz Millán Malo, quienes también realizaron la interpretación del difractograma. La muestra fue evaluada a los 92 días de curado.

En la figura 53 se muestra el difractograma obtenido junto con los minerales principales reconocidos en la muestra.

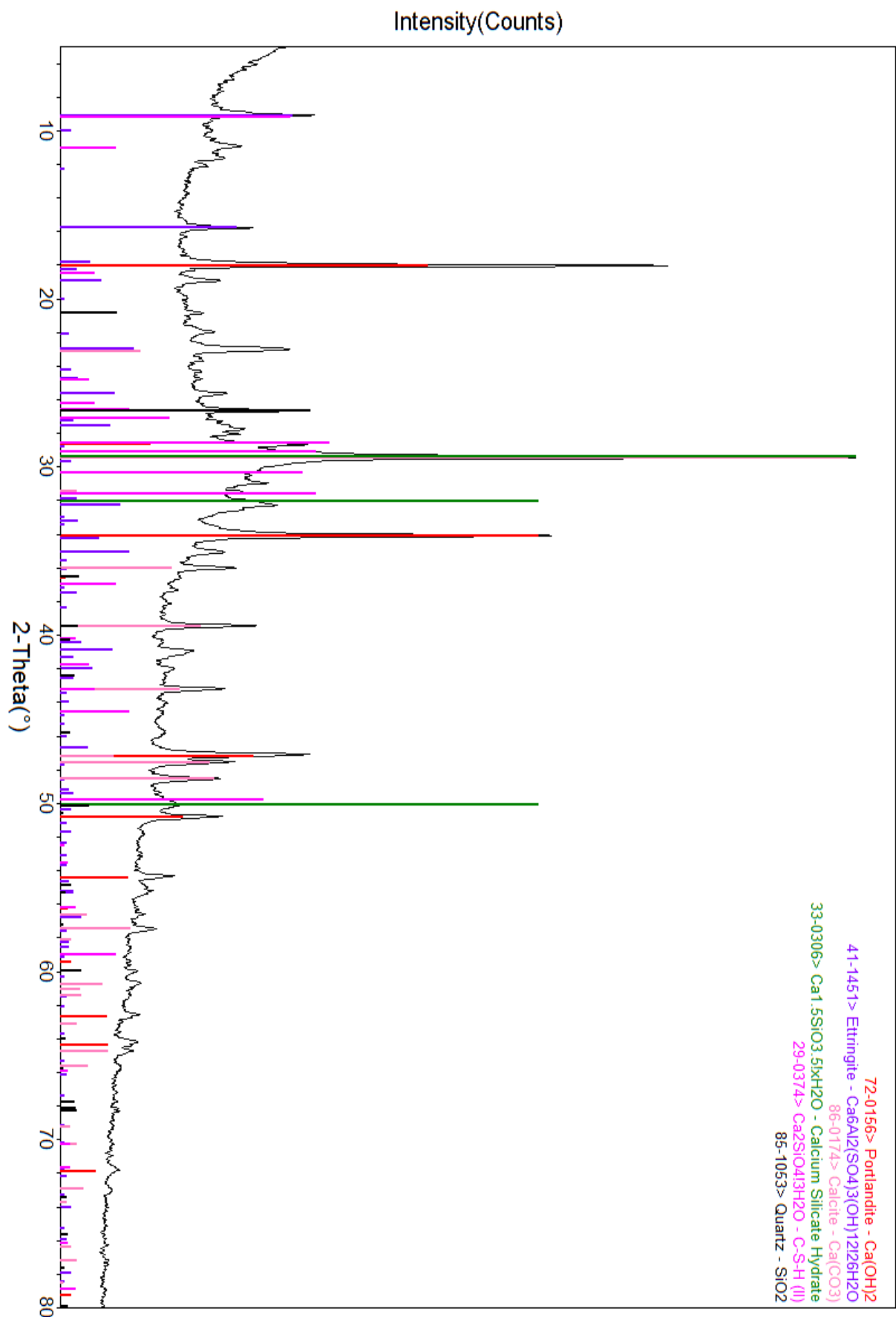


Fig. 53 Resultados de DRX

Caracterizar las partículas del cemento es complicado debido a su diminuto tamaño, formas complejas y la presencia de multifases naturales. Por lo cual, para caracterizarlo al igual que la pasta e identificar sus componentes mineralógicos se usan técnicas como: microscopia electrónica, difracción de rayos X y análisis térmico, entre otras. Una precisa caracterización debería servir para una mejor predicción del comportamiento del cemento y para un modelamiento más real del desarrollo microestructural (Bentz y Stutzman, 1994).

Los resultados que se obtuvieron arrojan como principales componentes: portlandita, etringita, calcita, hidrato de silicato de calcio, C-S-H y cuarzo.

La portlandita (hidróxido de calcio) tiene efectos positivos en tanto que es el encargado de mantener el pH de la pasta en valores altos (12-13) pues actúa como una reserva alcalina, mantiene a los concretos armados protegidos contra la corrosión electroquímica. También es positiva en el caso de concretos y morteros con áridos calizos, ya que en ellos la adherencia árido-pasta es mayor que en el caso de los áridos silíceos. También tiene efectos negativos tales como: solubilidad en agua y fácilmente lixiviable por disolución; puede reaccionar con sulfatos y cristalizar en forma de dihidrato dando lugar a procesos de expansión y ruptura y posteriormente a la formación de etringita; es el primer en descomponerse a altas temperaturas (600°C) en caso de incendio generando el desplome de la estructura (Calleja, 2001).

Etringita (trisulfoaluminato de calcio), los cristales de etringita son de formas alargadas, generalmente en hábitos fibrosos o en forma de varillas alargadas que se encuentran formando estructuras que asemejan un enrejillado que le da al cemento mayor cohesión, ya que se trata de la etringita positiva, pues la que genera expansión se encuentra generalmente dentro de las fisuras y grietas y se produce en edades mayores a 28 días (Giraldo, 2005).



Gel C-S-H, es el responsable de la armazón interna de la pasta de cemento, de la adherencia de ésta con los áridos en los morteros y concretos y, en definitiva, de la resistencia mecánica de estos conglomerados por lo que resulta un constituyente de la pasta indispensable y siempre positivo (Calleja, 2001).

El hidrato de silicato de calcio es producto del uso de puzolanas junto con cemento Pórtland, ya que se genera una reacción entre el hidróxido de calcio producido de la hidratación del cemento y el  $\text{SiO}_2$  amorfo de la fase de vidrio del material puzolánico, cuando esto ocurre se incrementa el hidrato de silicato de calcio formando gel C-S-H (Liu et al., 2005).

## V. CONCLUSIONES

El uso de puzolanas como material de sustitución de cemento es muy eficiente para modificar algunas de las propiedades esenciales de concretos y morteros, tales como la resistencia, la durabilidad y el costo que significa reemplazar al cemento por alguna puzolana.

En esta investigación se determinó la sustitución de 20% de CCA como la ideal, ya que el valor de la resistencia a compresión a 28 días es de 88.8% del valor de la resistencia de la muestra de control. Mientras que la muestra de control ya no aumenta su valor de resistencia a compresión y se mantiene casi constante a partir de los 28 días, la mezcla con sustitución de CCA sobrepasa el valor del control a los 60 días en un 9.29%, esto indica que se sigue formando gel C-S-H dado que este es el encargado de proveer resistencia y de llenar los poros en las mezclas para así generar muestras de concreto y mortero más densas. Cabe destacar que en esta investigación no se utilizó ningún tipo de aditivo en las mezclas, por lo que la posible utilización de estos materiales como sustitutos de cemento es totalmente viable.

A la edad de 100 días de curado la mezcla de mortero con CCA rebasó en un 33.18% de resistencia a compresión a la muestra de control, y la gráfica de resistencia a compresión de esta mezcla indica que la resistencia seguirá aumentando, por lo que resulta totalmente factible sustituir con CCA al cemento. Otra de las mezclas que dio un buen resultado en comportamiento fue la sustitución de un 10% de CCA, aunque esta última mostró un comportamiento distinto a la mezcla de 20%, ya que a los 28 días tuvo un promedio similar al control pero a los 60 días decayó su resistencia a compresión por debajo del control, y a los 100 días logró superar al control en un 26.8%.

Aunque los resultados de densidad, absorción y porcentaje de vacíos en el concreto no muestran un descenso en la porosidad en comparación con el control, esto no significa que el uso de la CCA no permita realizar un concreto más denso, que pueda ser utilizado en ambientes donde los sulfatos se encuentren en disolución y degraden al concreto. Estas pruebas de densidad, absorción y porcentaje de vacíos fueron hechas a 28 días de curado, por lo que se puede asegurar que a edades más tardías (60 y 100 días) las pruebas tendrían resultados mucho menores en cuanto a porosidad en comparación con el control, esta afirmación se respalda en el hecho de que las mezclas con sustitución empiezan a reaccionar sus elementos a la edad de 28 días, tal como se puede observar en las figuras de resistencia vs edad, esto puede ser debido a que la reacción puzolánica conlleva un poco más de tiempo para que empiece a generarse, además de que la difracción de rayos X demostró que a 92 días existe hidrato de silicato de calcio que seguirá formando gel C-S-H para llenar los poros que se encuentren en la muestra. Esto nos indica que la muestra seguirá incrementando su resistencia y su densidad. Si se logra generar un concreto más resistente y por ende más denso, no habrá lugar para que los agentes agresivos como los sulfatos se depositen y empiecen degradar al concreto.

Para poder solucionar el problema de la reacción puzolánica tardía, debe aumentar la superficie específica, por lo que en lugar de trabajar con el material que pasa por la malla no. 200, debería tamizarse el material por la malla no. 325 para así incrementar su finura y garantizar un alto índice de actividad puzolánica con lo que se obtendrían mejores resultados a los obtenidos en esta investigación.

## LITERATURA CITADA

ACI. 2001. "Guía para la durabilidad del hormigón". Informe del Comité ACI 201.2R-01, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ACI. 2008. "Guide to durable concrete". ACI Committee Report 201.2R-08, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Águila, I. 2001. "Cementos puzolánicos, una alternativa para Venezuela". Tecnología y Construcción, vol. 17-3: 27-34.

ASTM C 91. 1995. "Standard specification for masonry cement". American Section of the International Association for Testing Materials. Estados Unidos.

ASTM C 109M, I. 2002. "Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or (50-mm) cube specimens)". American Society for Testing and Materials. Estados Unidos.

ASTM C 511. 2003. "Standard specification for mixing rooms, moist cabinets, moist rooms, and water storage tanks used in the testing of hydraulic cements and concretes". American Society for Testing and Materials. Estados Unidos.

Bentz, D. P., y Stutzman, P. E. 1994. "Petrography of Cementitious Materials". ASTM STP 1215, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Estados Unidos. pp. 60-73.

Bernal, J. M. 2009. "Durabilidad en estructuras de concreto armado, localizadas frente a la costa". Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Calleja, J. 2001. "La Portlandita –hidróxido de calcio- y la Tobermorita –silicatos de calcio hidratados- de la pasta de cemento: tratamiento estequiométrico de sus comportamientos". Cemento y Hormigón, Vol 72. No. 824, 526-542.

Cordeiro, G. C., Toledo, R. D., Fairbairn, E. M., Tavares, L. M., y Oliveira, C. H. 2004. "Influence of mechanical grinding on the pozzolanic activity of residual sugarcane bagasse ash". International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures, Barcelona, España.

Cordeiro, G. C. 2006. "Use of sugar cane bagasse ash and rice husk ashes as mineral admixture in concrete". Tesis de Doctorado, Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil.

Cordeiro, G. C., Toledo, R. D., y Fairbairn, E. M., 2009. "Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete". Materials and Structures 42: 983-992.

Della, V. P., Kühn, I., y Hotza, D. 2002. "Rice husk ash as an alternate source for active silica production". Materials Letters 57: 818-821.

Ganesan, K., Rajagopal, K., y Thangavel K. 2007. "Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material". Cem Concr Compos 29: 515-24.

Giraldo, M. A. 2005. "Evolución mineralógica del cemento Pórtland durante el proceso de hidratación". Dyna, año 73, no. 148, pp: 68-81. Medellín, Colombia.

Hernández, C. O., y Mendoza, E. C. J. 2006. "Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico". Ing. invest. y tecnol. Vol. 7 no.1. Universidad Nacional Autónoma de México.

Hernández, M. H. 2007. "Sustitución parcial del cemento Pórtland en morteros mediante el uso de ceniza de calderas bagaceras", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

Hernández, Z. J. 2012. "Piedra pómez-cemento Pórtland". Cuerpo Académico de Materiales, Universidad Autónoma de Querétaro, México.

Liu, B., Xie, Y., y Li, J. 2005. "Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials". Cem. Concr. Res. 35: 994-998.

Neville, A. M. 1999. "Tecnología del Concreto". 1ª Edición, Fondo editorial del IMCYC, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. pag. 57.

Neville, A. M. 2001. "Maintenance and Durability of Concrete Structures". Concrete International.

Olivier, P. 2004. "The rice hull house". <http://www.thelaststraw.org/backissues/articles/Rice%20Hull%20House.pdf> (Fecha de consulta 25/08/2011).

Rodríguez, O. A. 2005. "Poder calorífico en combustibles". Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad Veracruzana.

Rukzon, S., y Chindaprasirt, P. 2011. "Utilization of bagasse ash in high-strength concrete". Materials and Design 34: 45-50.

SAGAR, 1998. "Tecnologías INIFAP para el cultivo de arroz en la región central de México". 1er. Simposium Internacional de Arroz: Memorias Conferencias Magisteriales. Secretaria de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. INIFAP Produce.



Sata, V., Jaturapitakkul, C., y Kiattikomol, K. 2007. "Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete". *Construction and Building Materials* 21: 1589-1598.

SGM, 2014. Carta Geológico-Minera escala 1:250,000. Clave F14-11. Servicio Geológico Mexicano.

Shetty, M.S. 2008. "Concrete technology: Theory and practice". S. Chand & Company Ltd. New Delhi, India.

Suraya, H. A., Ismail, A. R., Hamidah, M. S., y Fetra, V. R. 2012. "Pozzolanic properties of micronized biomass silica in enhancing compressive strength and water permeability of concrete". *Modern applied science*, vol. 6, No. 11,

Ugheoke, I. B., y Mamat, O. 2012. "A critical assessment and new research directions of rice husk silica processing methods and properties". *Maejo Int. J. Sci. Technol.* 6(03): 430-448.

Velosa, A. L., y Cachim., P. B. 2009. "Hydraulic-lime based concrete: Strength development using a pozzolanic addition and different curing conditions". *Constr. Build. Mater.* 23: 2107-2111.

**ANEXO A. Compresión en mortero con sustitución de piedra  
pómez**

Resistencia a compresión (kg.f) a 7 días.

		Peso (gr)	1a. Grieta	max
Control	1	262.53	1089.6	1265.6
	2	268.33	1106.6	1167.9
	3	264.26	954.07	962.49
10%	7	266.23	0	608.01
	8	262.9	708.22	788.48
	9	265.67	0	1011.5
20%	10	261.85	860.57	932.3
	11	266.3	914.55	1191.1
	12	259.97	885.09	972.86
30%	14	264.95	658.14	699.62
	15	257.73	599.6	687.97
	16	267.71	699.5	785.19

Resistencia a compresión (kg.f) a 14 días.

		Peso (gr)	1a. Grieta	max
Control	1	-	1800	1960.8
	2	-	1980	2017.3
	3	-	2285	2290.4
10%	1	-	1650	1688.1
	2	-	1613	1624.3
	3	-	1242.3	1242.3
20%	1	-	933	1125.7
	2	-	837	1154.6
	3	-	1290	1380.2
30%	18	261.19	701.57	1028
	19	257.99	769.51	988.1
	20	260.83	715	985.72

Resistencia a compresión (kg.f) a 28 días.

		Peso (gr)	1a. Grieta	max
Control	4	260.73	0	2024
	5	266.45	0	2090
	6	264.48	0	2117.9
10%	27	265.69	1163.3	1303.5
	28	265.87	1190.2	1377.1
	29	260.66	1140.2	1401.9
20%	13	260.82	1096.4	1448.2
	-	0	0	0
	-	0	0	0
30%	17	272.17	984.26	1194.2
	21	261.23	0	1234.9
	22	258.92	0	1165.3

Resistencia a compresión (kg.f) a 100 días.

		Peso (gr)	1a. Grieta	max
Control	34	256.42	1792.3	2130.2
	35	260.1	0	2320.8
	c3	253.09	0	2075.28
10%	1	254.98	1581.3	1713.1
	2	260.94	1667.1	1751.4
	3	259.98	1659	1724.1
20%	1	262.8	1376.8	1410.1
	2	252.4	0	1220.9
	3	262.48	0	1187.7
30%	23	266.75	1482.4	1530.5
	24	268.01	0	1318.7
	25	258.82	1339.5	1371

## ANEXO B. Compresión en mortero con sustitución de CBC

Resistencia a compresión (kg.f) a 28 días.

		Peso (gr)	1a. Grieta	max
Control	4	260.73	0	2024
	5	266.45	0	2090
	6	264.48	0	2117.9
10%	1	264.72	1141.6	1518.4
	2	262.72	1419.4	1782.5
	3	259.01	0	1548.3
20%	10	262.08	1247.8	1611.8
	11	260.86	1313.8	1321.4
	12	255.42	1006.7	1470.1
30%	19	279.09	1354	1468.5
	20	268.85	1368	1408
	21	277.7	1390	1431

Resistencia a compresión (kg.f) a 60 días.

		Peso (gr)	1a. Grieta	max
Control	31	259.3	1896	2106.1
	32	262.76	0	1949.3
	33	253.81	1672.9	2114.9
10%	7	262.76	1597.8	1883.4
	8	262.24	1649.6	1895.7
	9	261.42	1710	1823
20%	16	266.51	1387.6	1410.6
	17	262	1371.3	1520.2
	18	263.47	1436.3	1535.1
30%	22	271.76	1457	1618.2
	23	272.9	1415	1573.9
	24	271.71	1390.5	1445.2

Resistencia a compresión (kg.f) a 100 días.

		Peso (gr)	1a. Grieta	max
Control	34	256.42	1792.3	2130.2
	35	260.1	0	2320.8
	c3	253.09	0	2075.28
10%	4	260.74	1350.5	1830.8
	5	257.55	1294.2	2043.8
	6	260.67	1569.6	1954.7
20%	13	264.8	1302	1751
	14	253.91	1337	1794
	15	259.18	1462	1778
30%	25	279.3	0	2439.6
	26	279.91	0	2160.6
	27	275.07	1935	2146.5

## ANEXO C. Compresión en mortero con sustitución de CCA

Resistencia a compresión (kg.f) a 28 días.

		Peso (gr)	1a. Grieta	max
Control	4	260.73	0	2024
	5	266.45	0	2090
	6	264.48	0	2117.9
10%	50	270.19	1728.1	2050
	51	267.13	1660.4	2241
	52	264.28	1591	2017
20%	60	281.15	1901.9	2049.4
	61	280.38	1660.4	1842.5
	62	275.24	1572.3	1642.4
30%	70	252.97	1307.2	1689.1
	71	263.84	1372	1992
	72	259.21	1098.5	1900.2

Resistencia a compresión (kg.f) a 60 días.

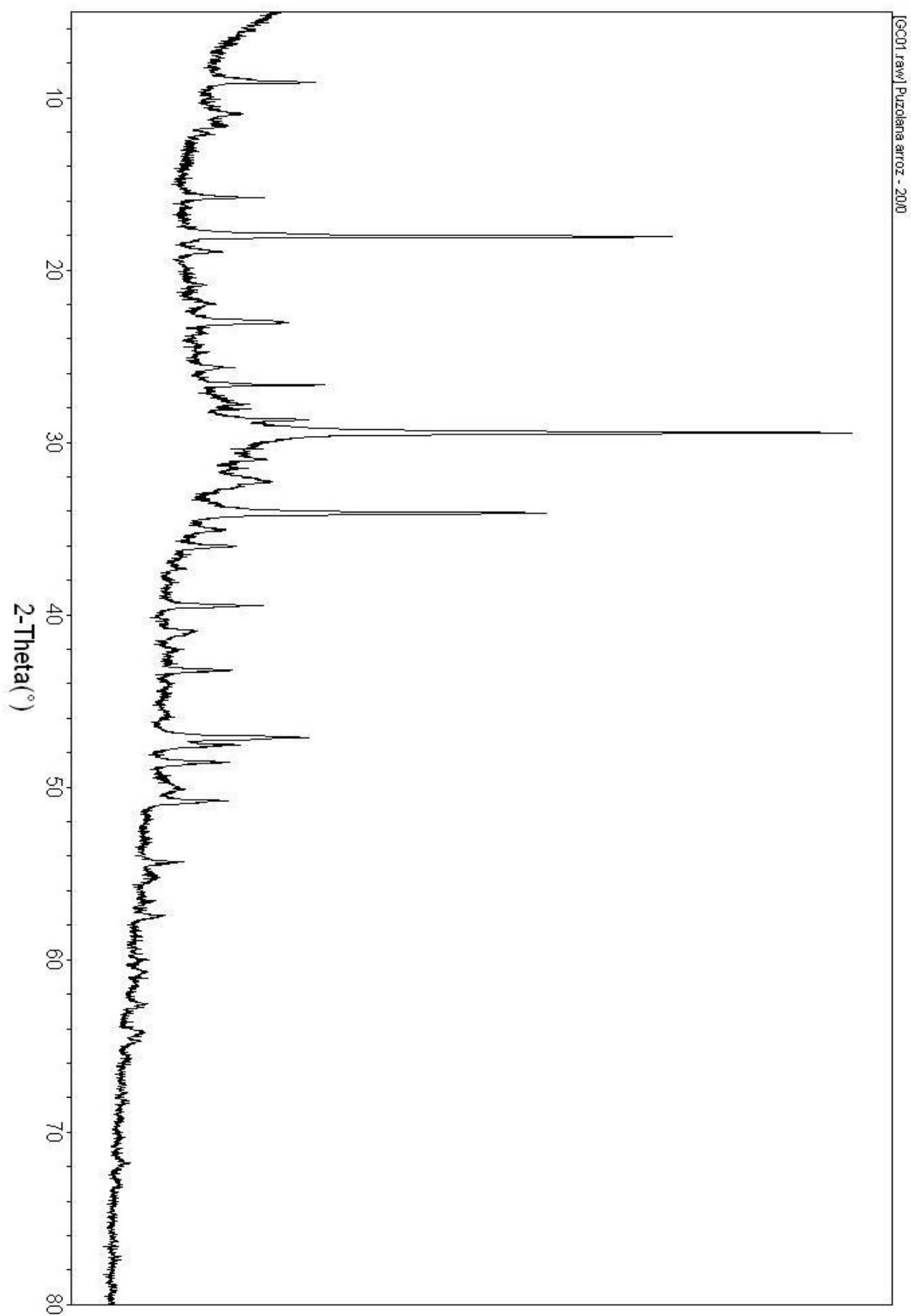
		Peso (gr)	1a. Grieta	max
Control	31	259.3	1896	2106.1
	32	262.76	0	1949.3
	33	253.81	1672.9	2114.9
10%	53	259.79	1887.3	1890.9
	54	267.51	1862.2	1902.4
	55	266.42	2041	2078.6
20%	63	285.55	2120	2390.4
	64	275.55	2012	2283.8
	65	281.1	1757.1	2069.8
30%	73	254.39	1616	1862.7
	74	263.9	1549.2	1820.6
	75	259.55	0	1723.5



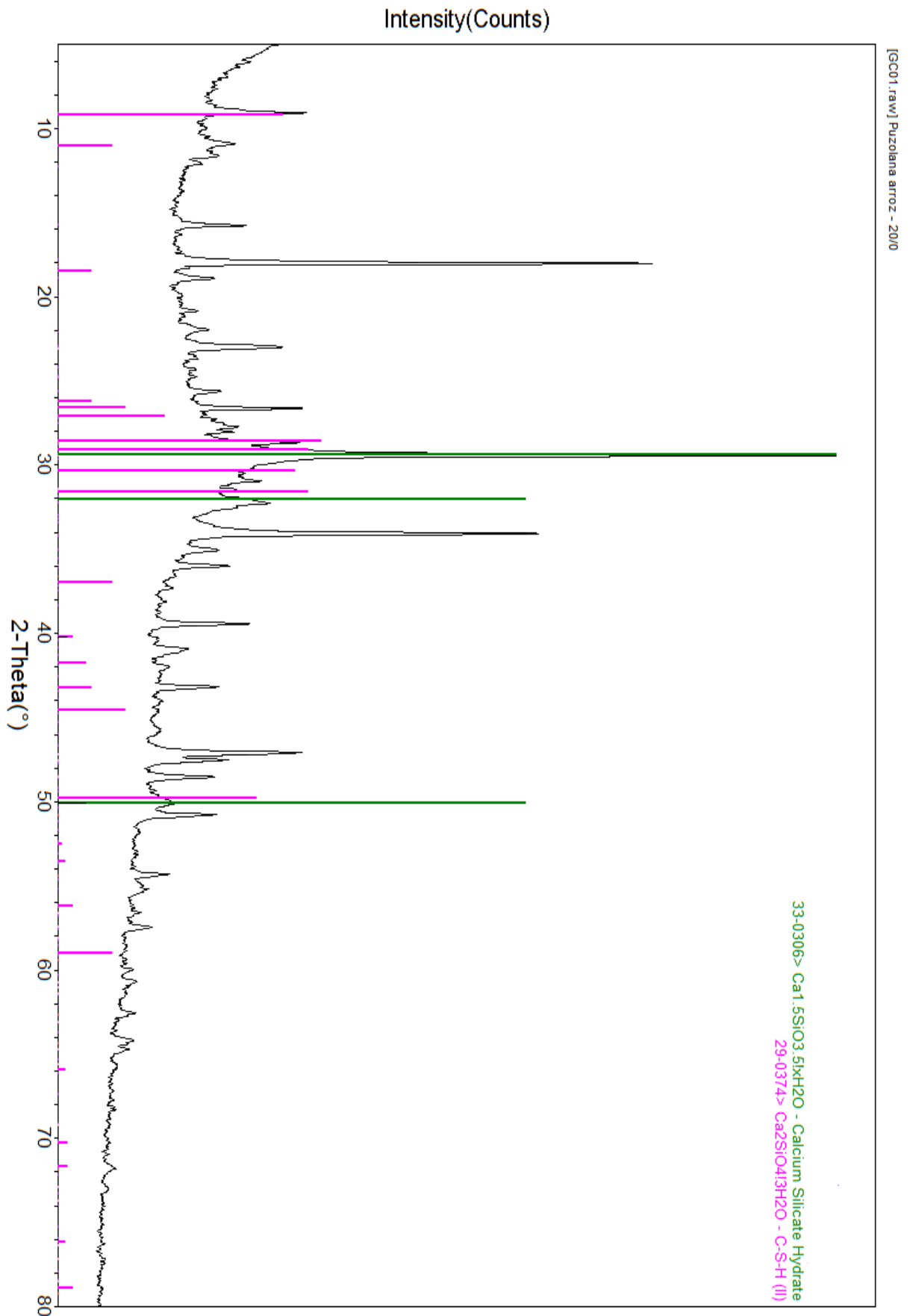
Resistencia a compresión (kg.f) a 100 días.

Control	34	256.42	1792.3	2130.2
	35	260.1	0	2320.8
	c3	253.09	0	2075.28
10%	56	266.84	2099.3	2735.6
	57	271.12	1669.2	1996.3
	58	264.44	0	2781.8
20%	66	277.93	0	3064.7
	67	261.99	0	1888.7
	68	281.05	0	2730.5
30%	76	262.15	1606.9	2119.5
	77	257.05	1523.6	1944.7
	78	262.9	2014.6	2016.8

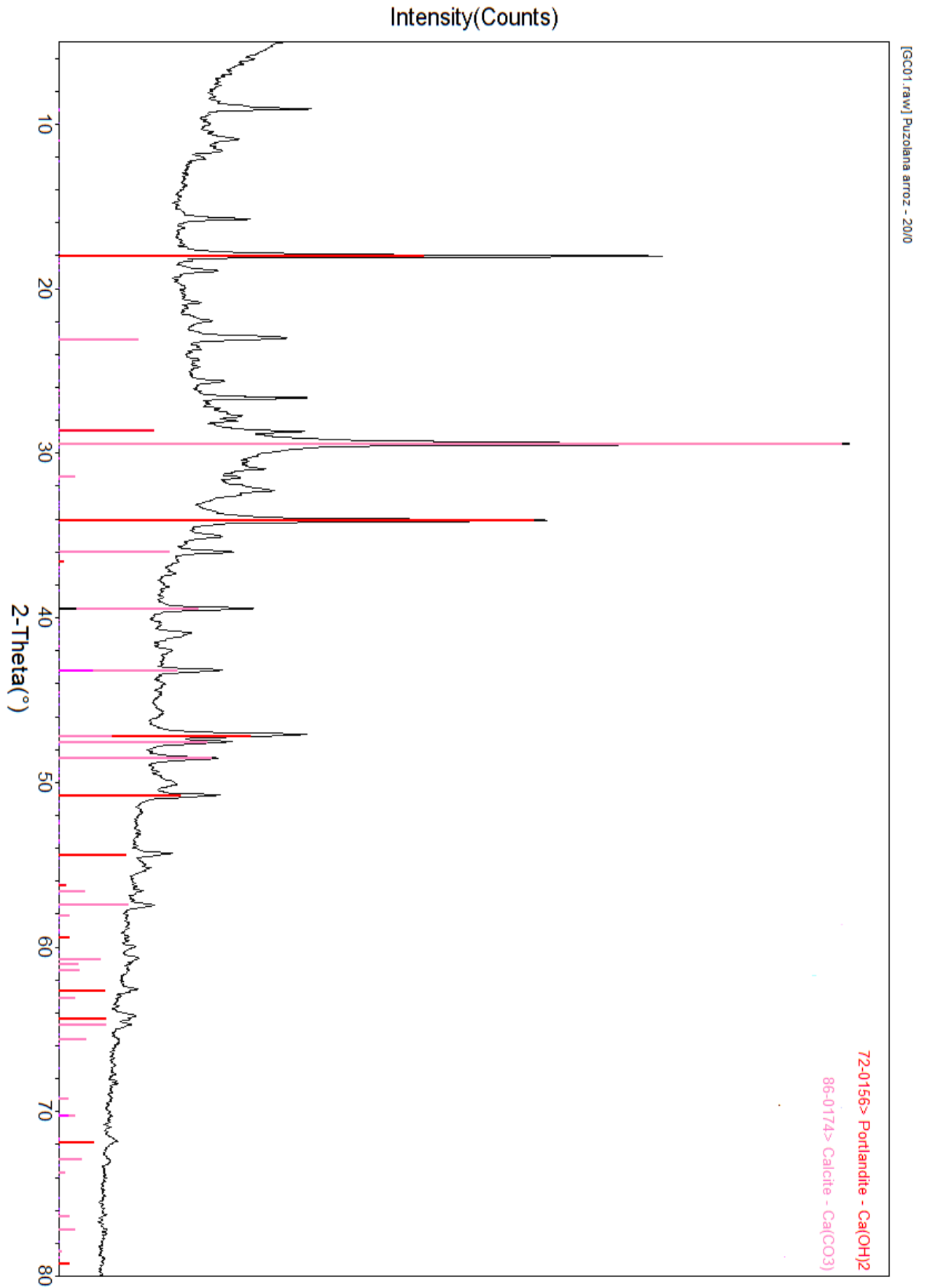
## ANEXO D. Difractograma e interpretación



Hidrato de silicato de calcio y C-S-H.



Portlandita y Calcita.



Etringita y Cuarzo.

