



## INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO INTEGRAL  
REGIONAL, UNIDAD OAXACA

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales.

---

DETERMINACIÓN DE LA REACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE ADICIONES  
MINERALES DE ORIGEN NATURAL CON EL CEMENTO PORTLAND.

---

### T E S I S

Para obtener el grado de  
**Maestro en ciencias**

Presenta:

**Roberto Román Méndez Mariano**

Directores:

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita  
Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez

Santa Cruz Xoxocotlán Oaxaca, Junio del 2008

---



# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

## ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 11 del mes de junio del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **Determinación de la reactividad puzolánica de adiciones minerales de origen natural con el cemento Pórtland.**

Presentada por el alumno:

**Méndez**  
Apellido paterno

**Mariano**  
materno

**Roberto Román**  
nombre(s)

Con registro: 

A	0	6	0	1	5	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

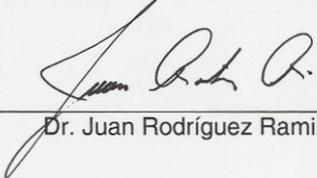
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

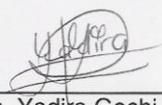
### LA COMISION REVISORA Directores de tesis

  
Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

  
Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez

  
Dr. Pedro Montes García

  
Dr. Juan Rodríguez Ramirez

  
Dra. Yadira Gochi Ponce

### LA PRESIDENTA DEL COLEGIO

  
Dra. Maria del Rosario Arnaud Viñas





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESION DE DERECHOS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 11 del mes junio del año 2008, el (la) que suscribe **Méndez Mariano Roberto Román** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **A060156**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del: **Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita** y el **Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez** y cede los derechos del trabajo titulado: **Determinación de la reactividad puzolánica de adiciones minerales de origen natural con el cemento Pórtland.**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: [posgradoax@ipn.mx](mailto:posgradoax@ipn.mx) ó [r2m2\\_19@hotmail.com](mailto:r2m2_19@hotmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

**MÉNDEZ MARIANO ROBERTO ROMÁN**



INSTITUTO POLITÉCNICO  
NACIONAL  
CIDIR-UNIDAD-OAXACA

México posee fuentes importantes de materiales de origen volcánico, los cuales pueden ser utilizados como puzolanas naturales para reemplazar cemento Portland en la industria de la construcción. Sin embargo, la mayoría de estos materiales no han sido estudiados; por lo tanto sus propiedades puzolánicas se desconocen y no se utilizan actualmente en la producción de concreto hidráulico. Con base en lo anterior, en este trabajo se analizaron cuatro materiales de origen volcánico provenientes de diferentes bancos ubicados en cuatro estados del país. Las propiedades analizadas incluyeron: morfología, área superficial, fineza, densidad y estructura interna así como también su composición química. Se evaluó el índice de actividad puzolánica en sistemas cemento Portland ordinario-puzolana en cubos de mortero a edades de 1, 3, 7, 14, 28, 56 y 180 días, y su reactividad puzolánica en sistemas hidróxido de calcio-puzolana en pastas y cubos de mortero. De manera adicional se investigó el efecto de los cuatro materiales en las propiedades reológicas de pastas elaboradas con cemento Portland. La sustitución de cemento Portland por materiales volcánicos fue de 10%, 20% y 30%. Los resultados indican que los materiales de Tecoman Colima (PTC), el de Apasco Estado de México (PAP) y el de Perote Veracruz (PVR) poseen las propiedades puzolánicas requeridas por las normas ASTM y además presentan actividad puzolánica con el cemento Portland Ordinario y con el hidróxido de calcio. El material de Macuspana Tabasco (PMC) no presenta actividad puzolánica en su forma natural, a pesar de contar con algunas propiedades de los materiales puzolánicos. Los resultados obtenidos de las pruebas reológicas indican que los materiales PMC y PAP producen las máximas y mínimas viscosidades de las pastas, respectivamente, ambas comparadas con pastas conteniendo solo cemento. Los materiales PTC y PVR no modifican de manera significativa la viscosidad de las pastas.

Mexico possesses important sources of volcanic materials, which may be used as natural pozzolans to replace Portland cement in the construction industry. However, most of these materials have not been studied; therefore their pozzolanic properties are unknown and are not currently used in the production of hydraulic concrete. Based on the foregoing, in this work four volcanic materials obtained from different sources in Mexico were studied. Their properties of interest included morphology, surface area, fineness, density and internal structure as well as their chemical composition. The pozzolanic activity index in ordinary Portland cement-pozzolan systems was evaluated in mortar cubes at 1, 3, 7, 14, 28, 56 and 180 days of age, as well as its pozzolanic reactivity in calcium hydroxide-pozzolan systems in paste and mortar cubes. In addition, the effect of the four volcanic materials in the rheological properties of Portland cement pastes was investigated. Portland cement replacements by volcanic materials were 10%, 20% and 30%. The results indicate that the materials of Tecoman Colima (PTC), of the Apasco México (PAP) and of Perote Veracruz (PVR) possess the pozzolanic properties required by the ASTM standards and present pozzolanic activity with ordinary portland cement and lime. The material of Macuspana Tabasco (PMC) does not possess any pozzolanic activity in its natural form, in spite of having some properties characteristic of pozzolanic materials. The results from the rheological tests indicate that the material PMC produces the highest viscosity of pastes, whereas the material PAP produces the lowest viscosity, both compared to pastes containing only portland cement. On the other hand, the materials PTC and PVR, do not significantly modify the viscosity of the pastes.

**Dedico esta tesis:**

**A la memoria de mis padres,**

**Roberto Méndez García y Romana Mariano Hernández**

Ya que su recuerdo me ha dado la fuerza para seguir adelante y lograr cada una de mis metas.

**A mi hermano Miguel Alejandro Méndez Mariano**

Por el apoyo incondicional y el cariño que siempre me ha brindado.

**Y a toda mi familia**

Porque siempre han estado a mi lado apoyándome en todos y cada uno de los momentos de mi vida.

### **A mis directores de tesis:**

**Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita y Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez**

Por su amistad, tiempo, orientación, conocimientos y enseñanzas brindados para la elaboración de la tesis.

### **A mis profesores de seminario de investigación:**

**Dr. Andrés Pech y Dr. Pedro Montes**

Por sus consejos y conocimientos brindados para la terminación de la tesis.

**A mis compañeros del CIIDIR: Sildia, Samuel, Carlos, Omar, Fernando y Jacobo**

Por la amistad, apoyo, críticas y comentarios brindados durante toda la maestría.

**A mis compañeros de la UANL: Alex, Bianca, Eva, Román, Francisco e Ismael.**

Por su amistad y todo el apoyo que me brindaron durante mi estancia en Monterrey.

**Al Instituto Politécnico Nacional y al CIIDIR Unidad Oaxaca**

Por aceptarme como alumno y permitirme realizar mis estudios de maestría en tan importante institución.

**Al Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León**

Por aceptarme y permitir realizar mi estancia de investigación en sus instalaciones y apoyarme en todo lo posible.

**Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**

Por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

**Al programa de movilidad estudiantil Santander Universia ANUIES**

Por brindarme el apoyo económico para realizar la estancia de investigación.

**Al Programa Institucional de Formación de Investigadores**

Por el apoyo económico brindado como parte del proyecto: “Polímeros naturales y adiciones minerales para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de materiales basados en cemento”, claves SIP IPN

20060430, 20070154 y 20080213.

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 ANTECEDENTES .....</b>	<b>3</b>
1.2.1 Materiales suplementarios artificiales .....	4
1.2.2 Materiales suplementarios naturales.....	6
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
1.4.1 Objetivo General.....	9
1.4.2 Objetivos Específicos.....	9
<b>1.5 HIPÓTESIS .....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 CEMENTO .....</b>	<b>10</b>
2.1.1 Definición.....	10
2.1.2 Producción del cemento Portland. ....	10
2.1.3 Tipos de cemento.....	12
2.1.4 Composición de los cementos.....	13
2.1.5 Especificaciones mecánicas y físicas del cemento.....	13
<b>2.2 EL CEMENTO PORTLAND ORDINARIO (CPO) .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND .....</b>	<b>15</b>
<b>2.4 LAS PUZOLANAS .....</b>	<b>17</b>
2.4.1 Las puzolanas naturales.....	17
2.4.2 Las puzolanas artificiales.....	18
<b>2.5 LA REACCIÓN PUZOLÁNICA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.6 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....</b>	<b>22</b>
<b>2.7 REOLOGÍA .....</b>	<b>23</b>
<b>CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 MATERIALES .....</b>	<b>26</b>
3.1.1 Materiales cementantes y agregados.....	26
3.1.2 Adiciones minerales.....	26
3.1.3 Agua.....	27

<b>3.2 MÉTODO</b> .....	<b>28</b>
3.2.1 Generalidades .....	28
3.2.2 Desarrollo experimental .....	28
3.2.3 Preparación de las adiciones minerales .....	29
3.2.4 Caracterización de las adiciones minerales .....	31
3.2.4.1 Análisis morfológico .....	31
3.2.4.2 Determinación de fineza de los materiales .....	32
3.2.4.3 Determinación de densidades de las puzolanas .....	32
3.2.4.4 Determinación del área superficial por adsorción de nitrógeno (BET) .....	33
3.2.4.5 Análisis mineralógico por difracción de rayos X .....	34
3.2.4.6 Análisis químico .....	35
3.2.4.7 Determinación del tamaño promedio de partículas .....	36
3.2.5 Experimentación en sistemas cemento Portland ordinario-puzolana .....	37
3.2.5.1 Reactividad puzolánica en morteros CPO-puzolana .....	37
3.2.5.2 Consistencia normal y tiempo de fraguado en pastas cemento-puzolana .....	39
3.2.6 Diseño de experimento en sistemas cal-puzolana .....	40
3.2.6.1 Reactividad puzolánica en morteros cal-puzolana .....	40
3.2.6.2 Reactividad puzolánica en pastas de cal-puzolana .....	42
3.2.7 Diseño de pastas en sistemas cemento blanco-puzolana .....	43
3.2.7.1 Propiedades reológicas en pastas cemento-puzolana .....	43
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>46</b>
<b>4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS ADICIONES MINERALES</b> .....	<b>46</b>
4.1.1 Análisis morfológico (MEB) .....	46
4.1.2 Fineza por la malla 325 (45 µm) .....	49
4.1.3 Área superficial (BET) .....	50
4.1.4 Densidad .....	51
4.1.5 Análisis químico .....	52
4.1.6 Análisis mineralógico (DRX) .....	52
4.1.7 Distribución del tamaño de partículas obtenidas por difracción de rayo láser .....	56
<b>4.2 SISTEMA CEMENTO PORTLAND ORDINARIO-PUZOLANA</b> .....	<b>57</b>
4.2.1 Reactividad puzolánica con el cemento Portland ordinario .....	57
4.2.2 Consistencia normal y tiempos de fraguado .....	63
<b>4.3 SISTEMA CAL-PUZOLANA</b> .....	<b>66</b>
4.3.1 Resistencia a la compresión en morteros cal-puzolana .....	66
4.3.2 Método alternativo A (Franke modificado) para pastas cal-puzolana .....	67
<b>4.4 REOLOGÍA DE PASTAS CEMENTO BLANCO-PUZOLANA</b> .....	<b>69</b>
4.4.1 Comparación de resultados en pastas Cemento Blanco-puzolana .....	69
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>73</b>
<b>5.1 CONCLUSIONES</b> .....	<b>73</b>
<b>5.2 RECOMENDACIONES</b> .....	<b>75</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>76</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Producción y consumo Nacional de Cemento. ....	2
Tabla 2. Tipos de Cemento. ....	12
Tabla 3. En la siguiente tabla se muestra la composición de los diferentes tipos de cemento. ....	13
Tabla 4. Clases de resistencia de los cementos. ....	13
Tabla 5. Cantidad de materiales utilizada para obtener densidades. ....	33
Tabla 6. Variables del experimento (morteros CPO-puzolana). ....	37
Tabla 7. Dosificación para 3 especímenes de mortero CPO-puzolana. ....	38
Tabla 8. Dosificación para obtener la Consistencia Normal. ....	39
Tabla 9. Proporción para mezclas de morteros cal-puzolana. ....	41
Tabla 10. Proporción para pastas cemento blanco-puzolana. ....	44
Tabla 11. Fineza de los materiales. ....	50
Tabla 12. Área superficial por BET. ....	50
Tabla 13. Densidad de las adiciones minerales. ....	51
Tabla 14. Composición química de los materiales. ....	52
Tabla 15. Óxidos mayores y álcalis equivalentes en cada puzolana. ....	52
Tabla 16. Fases minerales de los materiales. ....	53
Tabla 17. Tamaño de partículas de los materiales. ....	57
Tabla 18. Índice de actividad puzolánica con 10% de sustitución de CPO. ....	58
Tabla 19. Índice de actividad puzolánica con 20% de sustitución de CPO. ....	60
Tabla 20. Índice de actividad puzolánica con 30% de sustitución de CPO. ....	62
Tabla 21. Tiempos de fraguado por Vicat. ....	64
Tabla 22. Resultados de contenido de cal libre en pastas cal-puzolana según el método Franke. ....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Producción tradicional del cemento Portland.....	11
Figura 2. Evolución del calor de hidratación de un cemento Portland ordinario. 1: disolución del $K_2SO_4$ ; 2: etapa de reacción temprana; 3: periodo durmiente; 4: etapa de reacción media (formación del C-S-H); 5: formación de la etringita ( $C_6AS_3H_{32}$ ); 6: conversión de la etringita en monosulfoaluminato de calcio ( $C_4ASH_{12}$ ).....	16
Figura 3. Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas $C_3S$ -puzolanas.....	20
Figura 4. Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas $C_3A$ -puzolanas, en presencia de yeso e hidróxido de calcio.....	21
Figura 5. Ubicación de cada uno de los bancos de donde se extrajeron los materiales en estudio.....	27
Figura 6. Representación esquemática del desarrollo experimental.....	29
Figura 7. Equipo utilizado para la preparación de las adiciones minerales.....	30
Figura 8. Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).....	31
Figura 9. Equipo recubridor de muestras.....	32
Figura 10. Malla 325 (45 $\mu m$ ).....	32
Figura 11. Equipo de adsorción de nitrógeno.....	33
Figura 12. Equipo de difracción de rayos X.....	35
Figura 13. Equipo de fluorescencia de rayos X.....	36
Figura 14. Equipo de difracción de rayos láser.....	36
Figura 15. Mezcladora y báscula digital.....	38
Figura 16. Moldes para cubos de 5 $cm^3$ .....	38
Figura 17. Aparato de Vicat.....	40
Figura 18. Especímenes de mortero cal-puzolana.....	42
Figura 19. Ensayo de especímenes.....	42
Figura 20. Ebullición.....	43
Figura 21. Filtración.....	43
Figura 22. Reómetro.....	45
Figura 23. Pastas CB-puzolana.....	45
Figura 24. Imágenes del material en greña (PTC).....	46
Figura 25. Imágenes del material molido (PTC).....	46
Figura 26. Imágenes del material en greña (PAP).....	47
Figura 27. Imágenes del material molido (PAP).....	47
Figura 28. Imágenes del material en greña (PVR).....	48
Figura 29. Imágenes del material molido (PVR).....	48
Figura 30. Imágenes del material en greña (PMC).....	49
Figura 31. Imágenes del material molido (PMC).....	49

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica 1. Espectros de DRX del material PTC. ....	54
Gráfica 2. Espectros de DRX del material PAP. ....	54
Gráfica 3. Espectros de DRX del material PVR. ....	55
Gráfica 4. Espectros de DRX del material PMC. ....	56
Gráfica 5. Distribución del tamaño de partículas obtenidas por difracción láser. ....	57
Gráfica 6. Desarrollo de resistencia a la compresión con 10% de puzolanas.....	59
Gráfica 7. Desarrollo de resistencia a la compresión con 20% de puzolanas.....	61
Gráfica 8. Desarrollo de resistencia a la compresión con 30% de puzolanas.....	62
Gráfica 9. Tiempos de Fraguado Inicial y Final (Vicat). ....	65
Gráfica 10. Desarrollo de resistencia a la compresión de morteros cal-puzolana.....	67
Gráfica 11. Porcentaje de cal libre en pastas cal-puzolana (método Franke). ....	69
Gráfica 12. Reología en pastas de CB con 10% de puzolana. ....	70
Gráfica 13. Reología en pastas de CB con 20% de puzolana. ....	71
Gráfica 14. Reología en pastas de CB con 30% de puzolana. ....	72

## *Adiciones minerales:*

<b>PTC</b>	Puzolana de Tecoman Colima
<b>PAP</b>	Puzolana de Apasco Estado de México
<b>PVR</b>	Puzolana de Perote Veracruz
<b>PMC</b>	Puzolana de Macuspana Tabasco
<b>SF</b>	Silica fume (humo de Silice)
<b>MK</b>	Metakaolin (metacaolin)
<b>RHA</b>	Rice husk ash (ceniza de cascarilla de arroz)
<b>CV</b>	Ceniza volante

## *Cementos:*

<b>CPO</b>	Cemento Portland ordinario
<b>CPP</b>	Cemento Portland puzolánico
<b>CPEG</b>	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno
<b>CPC</b>	Cemento Portland Compuesto
<b>CPS</b>	Cemento Portland con Humo de silice
<b>CEG</b>	Cemento con escoria granulada de alto horno
<b>CB</b>	Cemento blanco

## *Técnicas de caracterización:*

<b>MEB</b>	Microscopio electrónico de barrido
<b>DRX</b>	Difracción de rayos X

## *Simbología de mezclas:*

<b>CN</b>	Consistencia normal
<b>CT</b>	Muestra control
<b>A/CM</b>	Agua / cemento
<b>A/MC</b>	Agua / material cementante

***Compuestos:***

<b>CaO</b>	Óxido de calcio “C”
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Dióxido de silicio “S”
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de aluminio “A”
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de hierro “F”
<b>C<sub>2</sub>S</b>	Silicato dicálcico: 2CaO.SiO <sub>2</sub> (Belita)
<b>C<sub>3</sub>S</b>	Silicato tricálcico: 3CaO.SiO <sub>2</sub> (Alita)
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Aluminato tricálcico: 3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	Ferroaluminato tetracálcico: 4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>C-S-H</b>	Silicato de calcio hidratado
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Hidróxido de calcio “portlandita”

***Normatividad:***

<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>ACI</b>	American Concrete Institute
<b>NMX</b>	Norma Mexicana
<b>ONNCCE</b>	Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

La industria de la construcción es un campo extenso, en el cual el cemento y el concreto son los materiales más utilizados del mundo. Con el avance del tiempo y la tecnología se ha demostrado que el concreto es susceptible a una serie de fenómenos físico-químicos que pueden afectar en forma considerable su durabilidad. Sin embargo, con el avance de la tecnología hoy en día podemos utilizar adiciones minerales (puzolanas) o materiales suplementarios para mejorar la calidad del concreto.

Las adiciones minerales involucradas en esta investigación, fueron obtenidas de diferentes zonas volcánicas de México y es probable que cuenten con las propiedades de una puzolana natural requeridas por las normas nacionales e internacionales, para ello, el objetivo de este trabajo es caracterizar y determinar la relación existente entre las propiedades físicas y la composición química de cuatro adiciones minerales de origen natural para determinar la reactividad puzolánica de cada uno de los materiales, con la finalidad de reducir el consumo de cemento Portland sustituyendo parte de este material hasta en un treinta por ciento en la producción de morteros, sin afectar adversamente sus propiedades.

Este trabajo está conformado de cinco capítulos. En el capítulo uno se presenta el planteamiento del problema, los antecedentes sobre investigaciones que involucran el uso de puzolanas, tanto naturales como artificiales en el concreto para mejorar sus propiedades físicas, este capítulo también incluye la justificación de esta investigación, el objetivo general y los objetivos específicos, así como las hipótesis planteadas. El capítulo dos abarca el marco teórico tomando como base el cemento Portland, las puzolanas y los fenómenos involucrados en la combinación de estos materiales. En el capítulo tres se presentan los materiales utilizados y el método seguido durante la parte experimental de este trabajo, el cual consistió en la preparación y caracterización de los materiales, así como la elaboración de los ensayos (pruebas físicas) los cuales se dividieron en tres partes: 1) Pruebas en sistemas cemento Portland-puzolana, 2) Pruebas en sistemas cal-puzolana y 3) Pruebas en sistemas cemento blanco-puzolana. El capítulo cuatro contiene los resultados y discusión de la caracterización de cada una de las adiciones minerales y de los ensayos realizados. Por último, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones obtenidas y las recomendaciones para trabajos posteriores.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación del medio ambiente asociada con la producción de los materiales de construcción es un problema que debe ser tomado en cuenta por cada una de las organizaciones involucradas, así mismo, es necesario considerar la conservación de los recursos naturales, los cuales son utilizados para satisfacer las necesidades de la población. Sin embargo estos recursos tan valiosos se están terminando ya que son utilizados sin aplicar ninguna medida preventiva que limite su uso.

Al respecto, Mehta (1998) establece que cuando se produce una tonelada de cemento se produce de manera simultánea aproximadamente una tonelada de CO<sub>2</sub> que va directamente a la atmosfera, la emisión de este gas incrementa el efecto invernadero lo que aumenta el calentamiento del planeta y provoca un severo daño al medio ambiente.

En la tabla 1 se muestra el incremento anual en la producción y el consumo de cemento a nivel nacional desde el año 2000 hasta el 2006. Tan solo en el 2006 las 31 plantas cementeras del país produjeron 37.9 millones de toneladas de cemento, comparando esta información con lo que establece Mehta, podemos mencionar que solo el año pasado, se emitieron 37.9 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en nuestro país.

Tabla 1. Producción y consumo Nacional de Cemento.

Año	Millones de toneladas		Habitantes	kg/hab
	Producción	Consumo		
2000	31.7	29.4	99,929,495	294
2001	30.0	27.7	101,208,925	273
2002	31.1	28.8	102,443,471	281
2003	31.9	29.6	103,636,353	285
2004	33.2	30.9	104,790,554	295
2005	34.7	33.2	105,909,000	314
2006	37.9	35.9	107,525,207	331

Fuente: Cámara Nacional del Cemento *CANACEM*, <http://www.canacem.org.mx/canacem.htm>

Actualmente para disminuir el problema de la contaminación generada en la producción de cemento Portland, se hace prioritario reducir el uso de cemento en el concreto,

sustituyendo a este material con subproductos como, ceniza volante, escoria de alto horno y humo de sílice, los cuales contribuyen a mejorar las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto, principalmente en lo que se refiere a su durabilidad en ambientes agresivos. Sin embargo, en México el costo de estos materiales es alto y no pueden ser utilizados en el concreto convencional.

Por tal razón y considerando que México cuenta con una región volcánica extensa es necesario evaluar y caracterizar nuevos materiales como puzolanas naturales. En la presente investigación se pretende estudiar diferentes bancos de materiales con el fin de hacer un buen uso de los recursos naturales además de mejorar las propiedades del concreto sin incrementar sustancialmente su costo.

## **1.2 ANTECEDENTES**

El uso de materiales cementantes en las construcciones ha perdurado a través del tiempo y han sido utilizados por diferentes civilizaciones. En un principio los egipcios utilizaron yeso impuro calcinado, los griegos y los romanos utilizaron caliza calcinada y posteriormente, aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedras trituradas o ladrillo y tejas quebradas, éste fue el primer concreto de la historia. El mortero de cal no endurece bajo del agua; por lo tanto, para las construcciones bajo del agua, los romanos mezclaron cal con ceniza volcánica o con tejas de arcilla quemada, finamente trituradas. La sílice activa y la alúmina que se encontraba en las cenizas y las tejas se combinaron con la cal para producir lo que se conoce como cemento puzolánico, proveniente del nombre del pueblo de Pozzuoli, cerca del Vesubio, primer lugar donde fue encontrada la ceniza volcánica. El nombre “cemento puzolánico” es usado hoy en día para describir los cementos obtenidos simplemente por moler materiales naturales a temperatura normal (Neville, 1999).

Algunas de las estructuras construidas por los romanos en las cuales la mampostería se unió con morteros, tales como el Coliseo en Roma y el Pont du Gard, cerca de Nimes, y las estructuras de concreto tal como el Panteón en Roma han sobrevivido hasta esta época, con su material cementante aún duro y firme. En las ruinas de Pompeya, el mortero se encuentra menos dañado por la intemperie que los agregados utilizados (Neville, 1999).

Algunos antecedentes relacionados con la investigación de materiales suplementarios para utilizarlos como puzolanas son los siguientes:

### **1.2.1 Materiales suplementarios artificiales.**

Escalante (2002), realizó una investigación donde indica que los niveles de reemplazo de los materiales puzolánicos por cemento pueden llegar hasta un 30%. Para el caso de la escoria de alto horno (deshecho de la producción de hierro), los niveles de sustitución por cemento son de 10 a 90 % y varían según las normas locales. Estos materiales, interacciona con los productos de hidratación del cemento pero la reacción es diferente ya que al igual que los materiales hidráulicos, la escoria de alto horno contiene calcio en su composición química.

Wang *et al.*, (2003), realizaron un estudio en donde examinaron el método para determinar el grado de hidratación del cemento y el grado de reacción puzolánica de la ceniza volante. Entre sus resultados, encontraron que la ceniza volante muestra buena actividad puzolánica al reaccionar con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y por lo tanto aumenta la hidratación del cemento.

La ceniza de cáscara de arroz (Rice Husk Ash, RHA) como puzolana, es un material que puede ser empleado en la fabricación de morteros y concretos de alta resistencia en la construcción. Nehdí *et al.*, (2003), desarrollaron una técnica para la controlar la combustión de la cáscara de arroz de Egipto y reducir los daños ambientales relacionados con la combustión de este subproducto, además de proporcionar un material suplementario para la industria de construcción con la ceniza obtenida. Se utilizó un reactor el cual proporciona una combustión eficiente de la cáscara del arroz en un corto plazo. Las investigaciones de la RHA incluyeron un análisis de óxidos, difracción de rayos X, contenido de carbón, demanda de agua, índice de la actividad puzolánica y distribución del tamaño de las partículas. Se evaluó la trabajabilidad con los requerimientos de superplastificante e inclusores de aire, la resistencia a la compresión del concreto y la resistencia a la penetración de cloruros. Los resultados indican que no hay incremento en el requerimiento de superplastificante e inclusores de aire cuando se usó el RHA producido con esta nueva técnica. Por otra parte, la nueva técnica requirió menos tiempo de quemado para obtener el RHA. Se elaboraron y compararon mezclas de concreto con proporciones de humo de sílice (SF) y RHA producido en Egipto (EG-RHA) y quemado a diversas temperaturas. La penetración de cloruros disminuyó substancialmente, mientras que

la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto con el RHA de la nueva técnica aumentó, excediendo la resistencia de los concretos con proporciones similares de SF, ya que el RHA tenía un índice de actividad puzolánica arriba de 117% en 7 días y 144% en 28 días.

Tangchirapat et al., (2005), analizaron ceniza de la palma de coco como material puzolánico en el concreto, este material es desechado por la industria del aceite de coco. La ceniza fue utilizada con un tamaño promedio de partículas de 15.9  $\mu\text{m}$  y 7.4  $\mu\text{m}$ . Utilizaron cemento Portland tipo I, reemplazando a este en un 10, 20, 30 y 40 % con la ceniza de palma de coco. Analizaron su resistencia a la compresión, tiempos de fraguado y ataque de sulfatos. Los resultados indicaron un retardo tanto en el fraguado inicial como en el final, el cual variaba de acuerdo a la fineza y al porcentaje de reemplazo. La resistencia a los 90 días fue mayor utilizando 10% de ceniza con un tamaño de partículas de 15.9  $\mu\text{m}$  y con un 20% de ceniza con un tamaño de partículas de 7.4  $\mu\text{m}$ . El porcentaje óptimo de sustitución es del 20%.

Love, et al., (2007), evaluaron la microestructura y la composición de las pastas de cemento Portland blanco con un 20% de metakaolin (MK) usando espectroscopia NMR y análisis TEM. Los resultados muestran que después de la hidratación para 1 día aproximadamente la mitad del cemento había reaccionado pero muy poco MK, para los 28 días dos tercios del total de cemento había reaccionado y la mayor parte del metakaolin. El alto nivel de reacción del MK en las pastas a los 28 días dio lugar a C-S-H altamente aluminoso, con la mayor parte de los sitios de enlace ocupados por  $\text{Al}^{3+}$  algo que  $\text{Si}^{4+}$ . Los datos para el C-S-H en la pasta son constantes con la tobermorita/jennite (T/J) y tobermorita/hidróxido de calcio (T/CH) para la nanoestructura del C-S-H.

Además de estos antecedentes, trabajos anteriores indican un desempeño satisfactorio del polvo de vidrio en el concreto como material puzolánico. Shayan y Xu (2005), analizaron polvo de vidrio obtenido de la basura de botellas refresco de diferentes colores. Se realizó un diseño de mezclas para un concreto de 40 MPa para realizar las pruebas necesarias, incorporando diferentes proporciones de polvo de vidrio (0, 20 y 30%) como reemplazo del cemento. Realizaron pruebas en losas de concreto utilizando fragmentos de vidrio como agregado. Además de realizar pruebas en cilindros y prismas a los cuales también se les examinó su microestructura. Los resultados mostraron baja resistencia a la compresión a los

28 días, pero a los 404 días esta se incremento hasta alanzar 55 MPa, superior a lo esperado. También se encontraron resultados favorables en pruebas de contracción por secado y penetración de cloruros, reduciendo la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo en los especímenes elaborados.

### **1.2.2 Materiales suplementarios naturales.**

Khandaker y Hossain (2003) investigaron ceniza volcánica y polvo de piedras de lava volcánica obtenida del volcán Mount Tavurvur localizado en la provincia de Papua Nueva Guinea, investigaron al material como reemplazo en la producción de cemento Portland en un rango de 0-50% de sustitución del material cementante. Las propiedades físicas y químicas fueron analizadas para evaluar su influencia en las propiedades del cemento. Se realizaron pruebas en pastas de cemento en estado fresco y en estado endurecido. Los resultados mostraron un buen potencial de los cementos mezclados con los materiales volcánicos, éstos presentaron un alto tiempo de fraguado y un bajo calor de hidratación usando un 20% de reemplazo del cemento.

Adnan Colak (2003), evaluó la influencia de una puzolana natural de origen volcánico en las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de pastas de cemento. Se utilizó un superplastificante tipo Naftaleno, y se encontró que el fraguado final de la pasta con puzolana natural está en un rango de 4-5 horas. Un reemplazo del 20% de puzolana con 1% de superplastificante, incrementa la resistencia y la durabilidad de las pastas de cemento.

S. Targan *et al.* (2003), examinaron el efecto de una ceniza volcánica como puzolana natural en las propiedades del cemento Portland. La puzolana la utilizaron reemplazando de 5-30% del cemento. Los resultados mostraron que el tiempo del fraguado final en pastas de cemento era acelerado y que el uso de 5% de puzolana natural incrementaba la resistencia a la compresión de los especímenes comparados con la muestras de referencia a los 60 días.

En el 2004, Khandaker y Hossain ampliaron su investigación utilizando material de piedras volcánicas (volcanic pumice, VP) formadas durante la solidificación de la lava, éste material se utilizó como agregado grueso en la producción de concreto ligero con un tamaño máximo de 20 mm. En las pruebas se sustituyó en el concreto de 0-100% del agregado grueso.

Se evaluó su efecto en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Las propiedades del concreto con polvo de piedra volcánica (volcanic pumice concrete, VPC) usando diversos porcentajes de agregado fueron evaluadas con una serie de pruebas, entre otras la trabajabilidad, resistencia mecánica, módulo de elasticidad, contracción y permeabilidad. Se concluyó que el VPC tiene suficiente resistencia y una densidad adecuada para ser aceptado como concreto ligero estructural.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo pretende caracterizar y determinar la reactividad puzolánica de cuatro bancos de materiales de origen volcánico para definir su factibilidad y su posible uso como nuevas adiciones minerales. Además, se definirá si los nuevos materiales pueden llegar a sustituir un porcentaje del clínker en la producción del cemento Portland de acuerdo a la reactividad de cada uno de ellos, coadyuvando lo anterior en beneficios tecnológicos y ecológicos importantes en la construcción.

Los beneficios que proporcionan las puzolanas naturales se ven reflejados en diversos aspectos de las propiedades del concreto. Durante el proceso de hidratación del cemento, se producen simlicatos de calcio hidratados (C-S-H) que son responsables de la resistencia mecánica del concreto, esto sucede como resultado de la hidratación del silicato tricálcico ( $C_3S$ ) y del silicato dicálcico ( $C_2S$ ). Al mismo tiempo que se producen los C-S-H, se libera una gran cantidad de cal (hidróxido de calcio), esta cal representa aproximadamente un 30 % de la masa anhídrida del cemento.

La cal liberada en la reacción de los compuestos potenciales del cemento Portland contribuye muy poco a la resistencia de la pasta de cemento y puede ser responsable de los problemas de durabilidad, debido a que puede ser expulsada fácilmente por el agua en el proceso de lixiviación. Esta acción de expulsión resulta en un incremento de la porosidad de la matriz de la pasta de cemento. La única característica positiva de la cal en el concreto, es que ayuda a mantener un alto potencial hidrógeno (pH), lo cual incrementa la estabilidad de la capa de óxido que produce la pasivación del acero de refuerzo.

Por lo tanto, al mezclar las puzolanas con el cemento Portland en una proporción adecuada (entre un 20 ó 30 %) para fabricar concreto, teóricamente la cal producida durante la hidratación del cemento Portland puede ser consumida y transformada en C-S-H, que es la fase mineral que aporta la resistencia mecánica del concreto.

Es importante aclarar que a pesar de lo antes mencionado, durante la hidratación del cemento Portland la reacción puzolánica nunca es completada. Sin embargo, el uso de las puzolanas en el cemento para fabricar concreto trae beneficios en el aspecto de durabilidad, ya que aumenta propiedades como la trabajabilidad, impermeabilidad, resistencia mecánica a edades avanzadas, así como la reducción de la reacción álcali-agregado y por lo tanto, todo esto redundará en un beneficio económico al disminuir el consumo de cemento Portland (Mehta, 1998).

Otro aspecto importante como justificación de este trabajo es que de los materiales utilizados para elaborar concreto (cemento, arena, grava y agua), el cemento es el de mayor costo en comparación con el resto de materiales involucrados en la mezcla de concreto. De modo que una reducción de cemento, sustituyéndolo por otro material de menor costo, contribuye a mejorar la competitividad del mismo como material de construcción.

Además, al reducir la cantidad de cemento Portland que se consume para elaborar concreto, se disminuye la cantidad de energía utilizada en la fabricación de este material, y las emisiones de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) a la atmósfera se reducirán, haciendo un proceso menos dañino.

Lo anterior justifica la realización de la experimentación para caracterizar a nuevos bancos de materiales puzolánicos y con esto correlacionar las propiedades físico-químicas con la actividad puzolánica, así como implementar el uso de puzolanas naturales para disminuir el consumo de cemento en la construcción.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo General.

Caracterizar las propiedades físicas y conocer la composición química de cuatro diferentes adiciones minerales de origen natural y determinar la reactividad puzolánica de cada una de las adiciones, así como determinar la relación existente entre estas características para sustituir parcialmente el consumo de cemento Portland en la producción de morteros, sin afectar adversamente sus propiedades en estado fresco y endurecido.

### 1.4.2 Objetivos Específicos.

- Caracterizar las propiedades físicas y químicas de cuatro adiciones minerales.
- Evaluar morteros en sistemas cemento Portland ordinario-puzolana y cal-puzolana.
- Determinar la reactividad puzolánica de las adiciones minerales en morteros de cemento Portland ordinario-puzolana y cal-puzolana.
- Determinar la velocidad de hidratación de pastas de cal y las diferentes adiciones minerales.
- Correlacionar la actividad puzolánica con las características físicas y la composición químicas de cada puzolana.
- Determinar el porcentaje óptimo de puzolana para sustituir al cemento Portland.
- Evaluar la viscosidad de pastas cemento blanco-puzolana.

## 1.5 HIPÓTESIS

Los cuatro materiales de origen volcánico seleccionados de diferentes partes del país:

- Cuentan con las propiedades de una puzolana natural requeridas por la norma ASTM C 618-05.
- Tienen reactividad puzolánica con el hidróxido de calcio.
- Incrementan la resistencia a la compresión de morteros a edades avanzadas.
- Mejoran la viscosidad en pastas de cemento.

### 2.1 CEMENTO

#### 2.1.1 Definición.

En el sentido general de la palabra, “el cemento puede definirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto”. Esta definición comprende una gran variedad de materiales cementantes (Neville, 1999).

Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto se denominan cementos hidráulicos. El cemento hidráulico es un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua, ya sea sólo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conservará su resistencia y estabilidad (NMX-C-414-ONNCCE).

Los cementos hidráulicos están compuestos principalmente por silicatos y aluminatos de calcio y pueden clasificarse, en general, como cementos naturales, cementos Portland y cementos de alta alúmina (Neville, 1999).

#### 2.1.2 Producción del cemento Portland.

El cemento Portland está definido por la norma ASTM C 150 como un conglomerante hidráulico producido al pulverizar el clínker que consiste esencialmente de silicatos de calcio, conjuntamente con una o más formas de sulfato de calcio. El clínker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y es producido por una mezcla de materiales sintetizados a aproximadamente 1450° C. Los principales óxidos presentes en la materia prima son CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Mehta, 1998). Los materiales usados para la producción del cemento Portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro. Durante la fabricación, se hace análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizarse una calidad alta y uniforme del cemento (Kosmatka, 2004).

En la figura 1 se muestran en forma general las etapas de fabricación del cemento tanto en el proceso en seco como en el proceso por vía húmeda.

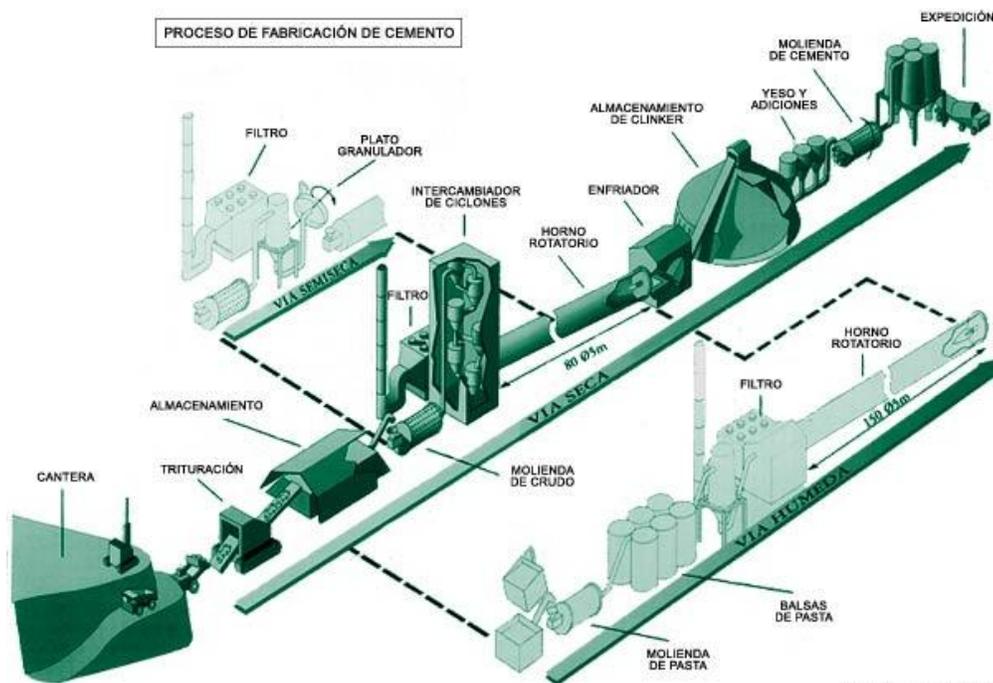


Figura 1. Producción tradicional del cemento Portland  
(Fuente: IECA, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones).

Las materias primas seleccionadas se transportan de la cantera, se trituran, se muelen y se dosifican de tal manera que el material resultante tenga la composición deseada. El material crudo es generalmente una mezcla de material calcáreo (carbonato de calcio), tal como la caliza y material arcilloso (sílice y alúmina), tal como arcilla, pizarra (esquisto) o escoria de alto horno. Es posible fabricar cemento tanto por vía seca como por vía húmeda. En el proceso de vía seca, las operaciones de molienda y mezcla se efectúan con los materiales secos, ya en el proceso por vía húmeda los materiales se mezclan con agua en la forma de pasta. En otros aspectos, el proceso seco y el proceso húmedo son muy similares (Kosmatka, 2004).

Después del mezclado, se alimenta la materia prima molida en la parte superior del horno. El material crudo pasa a lo largo del horno rotatorio en forma controlada por la inclinación y la velocidad de rotación del horno. El combustible (carbón, aceite, fuel-oil, gas natural, llantas de goma y subproductos) calienta la parte inferior del horno hasta alcanzar una

temperatura aproximada de 1450 °C, lo que cambia químicamente al material crudo en clínker, las cuales son pequeñas esferas grises con tamaño predominante de canicas de 1” aproximadamente.

Después de esto, el clínker se enfría y pulveriza. Durante esta operación, se adiciona una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado del clínker. En el molino, el clínker se muele tan fino que puede pasar, casi completamente, a través de la malla 325 (45 μm). Este polvo gris extremadamente fino es el cemento Portland (Kosmatka, 2004).

### 2.1.3 Tipos de cemento.

Se fabrican diferentes tipos de cemento Portland para satisfacer los requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas. En México, la fabricación del cemento Portland se produce de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación), la última revisión a esta norma está vigente a partir del 27 de septiembre del 2004. De acuerdo con esta norma, hay seis tipos básicos de cementos, los cuales se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Tipos de Cemento.

<b>Tipo</b>	<b>Denominación</b>	<b>Descripción</b>
CPO	Cemento Portland ordinario	Es el cemento producido a base de la molienda de clínker Portland y usualmente, sulfato de calcio.
CPP	Cemento Portland puzolánico	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker Portland, materiales puzolánicos y usualmente, sulfato de calcio.
CPEG	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker Portland, escoria de alto horno y usualmente, sulfato de calcio.
CPC	Cemento Portland compuesto	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker Portland, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En este caso la caliza, puede ser el único componente.
CPS	Cemento Portland con humo de sílice	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker Portland, humo de sílice y usualmente sulfato de calcio.
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker Portland y mayoritariamente escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.

Fuente: Norma NMX-C-414-ONNCCE.

Además, estos cementos pueden presentar características especiales, tales como RS – resistente a sulfatos; BRA – baja reactividad álcali-agregado; BCH – bajo calor de hidratación; B – blanco (Norma NMX-C-414-ONNCCE).

### 2.1.4 Composición de los cementos.

Tabla 3. En la siguiente tabla se muestra la composición de los diferentes tipos de cemento.

Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					Minoritarios**
		Clínker		Principales			
		Portland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos*	Humo de sílice	Caliza	
CPO	Cemento Portland ordinario	95-100	-	-	-	-	0-5
CPP	Cemento Portland puzolánico	50-94	-	6-50	-	-	0-5
CPEG	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno	40-94	6-60	-	-	-	0-5
CPC	Cemento Portland compuesto***	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	Cemento Portland con humo de sílice	90-99	-	-	1-10	-	0-5
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno	20-39	61-80	-	-	-	0-5

Fuente: Norma NMX-C-414-ONNCCE.

\*Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes.

\*\*Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales, a menos que estén incluidos ya como tales en el cemento.

\*\*\*El cemento Portland compuesto debe llevar como mínimo dos componentes principales, excepto cuando se adicione caliza, ya que ésta puede estar en forma individual en conjunto con clínker+yeso.

### 2.1.5 Especificaciones mecánicas y físicas del cemento

Tabla 4. Clases de resistencia de los cementos.

Clase Resistente	Resistencia a la Compresión (MPa)			Tiempo de Fraguado (min)	
	3 días		28 días	Inicial	Final
	mínimo	mínimo	máximo	Mínimo	máximo
20	-	20	40	45	600
30	-	30	50	45	600
30 R	20	30	50	45	600
40	-	40	-	45	600
40 R	30	40	-	45	600

Fuente: Norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE.

Debido a la diversa gama de cementos disponibles es importante distinguir los de uso general y los de uso especial. La diferencia está en función de la resistencia mecánica desarrollada y la durabilidad que puede desarrollar un concreto con respecto al tiempo y los diferentes agentes agresivos.

Desde el punto de vista económico siempre es recomendable optar por un cemento de uso general, a menos que se determine alguno de uso especial debido a la condición de exposición de la estructura y a los requerimientos del cálculo estructural o por un proceso constructivo más específico en el manejo del concreto.

## **2.2 EL CEMENTO PORTLAND ORDINARIO (CPO)**

El Cemento Portland Ordinario tiene, en principio, los mismos empleos que los de otros tipos, con las salvedades y matizaciones de cada caso. Por ejemplo, en condiciones comparables de resistencia mecánica el Cemento Portland Ordinario, en general, genera un mayor calor de hidratación y es más sensible a los ataques químicos por medios ácidos y salinos (en particular, por sulfatos). No obstante, este cemento puede ostentar, en determinados casos, las características especiales de bajo calor de hidratación y de resistente a los sulfatos.

Como factor positivo se puede señalar que el cemento Portland ordinario puede conferir una mayor protección a las armaduras contra la corrosión metálica, por lo cual el Cemento Portland Ordinario es utilizable con ventaja en el caso de concreto pretensado que implique una gran responsabilidad y siempre que se tenga en cuenta la posibilidad de fisuración por retracción (sobre todo térmica), en particular por lo que pueda afectar a la propia corrosión de armaduras.

El Cemento Portland Ordinario es especialmente apto para la prefabricación, particularmente sin tratamientos higrotérmicos y concretos de altas resistencias, en obras públicas especiales y de gran responsabilidad como puentes de concreto pretensado, otras estructuras pretensadas, etc. En el caso de concretos con cenizas volantes, sobre todo en proporciones altas, son aconsejables, prácticamente en exclusiva, el Cemento Portland Ordinario.

## 2.3 HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

Químicamente, la hidratación del cemento Portland consiste en una serie de reacciones entre los minerales del clínker, el sulfato de calcio y el agua, los cuales proceden de manera simultánea y sucesivamente en diferentes niveles y están influenciadas unas con otras. Los participantes en este proceso son:

- Alita, i.e silicato tricálcico alimentado con iones positivos;
- Belita, i.e silicato dicálcico alimentado por iones positivos;
- Aluminato tricálcico;
- Ferro aluminato de calcio (las fases del fierro);
- Óxido de calcio libre;
- Álcali sulfatos;
- Sulfato de calcio en la forma de bihidrato, hemihidrato o anhidrita con clínker;
- Agua de mezclado.

El proceso de hidratación consiste en reacciones simultáneas que ocurren de los compuestos anhidros con agua. Se sabe que los aluminatos se hidratan más rápidamente que los silicatos. En realidad, las características de la rigidización (pérdida de consistencia) y del fraguado (solidificación) de una pasta de cemento Portland, son determinadas en gran parte por las reacciones de hidratación que involucran a los aluminatos.

Los silicatos, que representan aproximadamente en un 75 % del cemento Portland ordinario, juegan un papel predominante para determinar las características del endurecimiento (velocidad de desarrollo de resistencia) (Mehta, 1998).

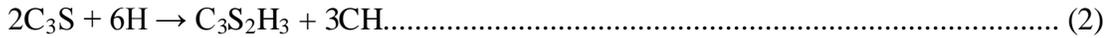
El Silicato de Calcio Hidratado (**C-S-H**) es la principal fase de hidratación y la responsable de la resistencia mecánica de las pastas de cemento, es similar al producido en las reacciones individuales de  $C_3S$  y  $C_2S$  y exhibe poca cristalinidad, en su estructura pueden quedar embebidos iones como  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$  o  $SO_4^{-2}$ .

Los compuestos potenciales reaccionan con el agua para producir los productos de reacción como sigue:

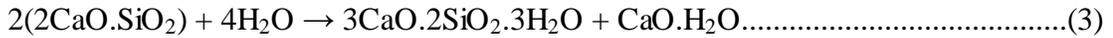
Silicato tricálcico + agua  $\rightarrow$  C-S-H + hidróxido de calcio



Que en forma abreviada se representa de la siguiente manera:



Silicato dicálcico + agua  $\rightarrow$  C-S-H + hidróxido de calcio



Que en forma abreviada se representa de La siguiente manera:



Cuando un cemento es hidratado, los compuestos reaccionan con agua para adquirir estados estables de baja energía y el proceso es acompañado por una liberación de energía en forma de calor. En otras palabras, las reacciones de hidratación de los compuestos de cemento Portland son exotérmicas.

La cantidad total de calor liberado y las velocidades de liberación de calor de la hidratación de los compuestos individuales pueden utilizarse como índices de su reactividad (Mehta, 1998), ver figura 2.

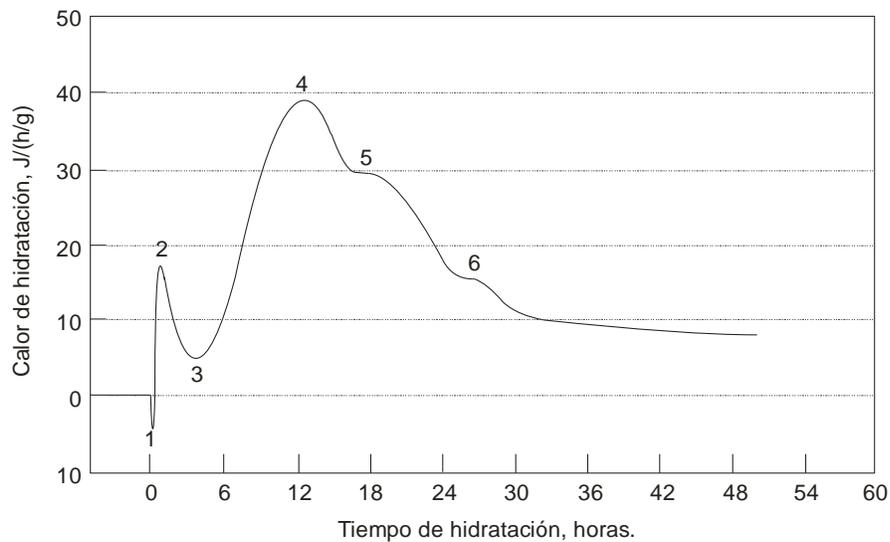


Figura 2. Evolución del calor de hidratación de un cemento Portland ordinario. 1: disolución del  $K_2SO_4$ ; 2: etapa de reacción temprana; 3: periodo durmiente; 4: etapa de reacción media (formación del C-S-H); 5: formación de la etringita ( $C_6AS_3H_{32}$ ); 6: conversión de la etringita en monosulfoaluminato de calcio ( $C_4ASH_{12}$ ).

Fuente: Peter Hewlett. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*.

## 2.4 LAS PUZOLANAS

La norma ASTM 618 define lo siguiente: "las puzolanas son materiales silíceos o aluminosilíceos que por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio  $\{Ca(OH)_2\}$  a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes".

### 2.4.1 Las puzolanas naturales.

La norma ASTM 618 especifica lo relacionado con las puzolanas naturales tipo N, que pueden ser utilizadas en la producción de concretos, y establece los requerimientos físicos y químicos que deben cumplirse.

Con la excepción de las tierras diatomáceas, todas las puzolanas naturales se derivan de las rocas y minerales volcánicos. Durante las explosivas erupciones volcánicas, el rápido enfriamiento del magma, compuesto principalmente de aluminosilicatos, resulta en la formación de vidrio o de fases vídrias con una estructura desordenada. Debido a la evolución simultánea de los gases disueltos, la materia solidificada frecuentemente adquiere una textura porosa con una alta área superficial que facilita un ataque químico subsecuente. Puesto que los aluminosilicatos con una estructura desordenada no permanecerán estables al exponerlos a una solución de cal, esto se convierte en la base para las propiedades puzolánicas de los vidrios volcánicos.

Las tierras diatomáceas consisten en sílices opalinos o amorfos hidratados, derivados del esqueleto de diatomitas, que son pequeñísimas plantas de agua con las paredes de las celdas compuestas de cáscaras de sílice. El material es puzolánico cuando está puro, pero se encuentra generalmente contaminado con minerales de arcilla y por lo tanto debe ser activado térmicamente para impulsar su reactividad puzolánica.

La clasificación de las puzolanas naturales es difícil, porque los materiales raramente contienen solamente un constituyente reactivo. Sin embargo, con base en los constituyentes

reactivos principalmente presentes, se puede hacer una clasificación de vidrios volcánicos, turbas volcánicas, arcillas calcinados o lutitas y tierras diatomáceas (Mehta, 1998).

#### **2.4.2 Las puzolanas artificiales.**

Las puzolanas artificiales, son subproductos de procesos industriales y requieren por consiguiente equipo para su disposición, en algunos casos se requiere un tratamiento para obtener la mayor reactividad de éstas, entre las puzolanas artificiales podemos citar las *cenizas volantes*, las cuales se producen en la combustión de carbón mineral en las plantas térmicas de generación de electricidad. *Arcillas activadas* o calcinadas artificialmente: por ejemplo residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800 °C. El *humo de sílice*, proveniente de la industria de aleaciones de ferro-silicio. *Escorias de fundición*: principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos, estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa. Las *cenizas de residuos agrícolas*: como la *ceniza de cáscara de arroz* y las *cenizas del bagazo 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 (Neville 1999).

### **2.5 LA REACCIÓN PUZOLÁNICA**

La reacción entre una puzolana y el hidróxido de calcio es llamada la reacción puzolánica. Cuando reaccionan en una mezcla, el cemento Portland y la puzolana en la presencia de agua, una reacción similar a la reacción ácido-base se lleva a cabo, participando por una parte la cal y los álcalis liberados por la reacción de hidratación del cemento Portland y por la otra los óxidos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) de la puzolana, por consiguiente, la presencia de la puzolana en el sistema de hidratación modifica los mecanismos de hidratación de los compuestos principales del cemento Portland, afectando el calor de hidratación, contenido de hidróxido de calcio, la cantidad de agua combinada y el grado de reacción de los componentes (Valdez, 2002).

Los factores que se deben considerar influyentes en la reacción puzolánica son:

- Las fases activas de la puzolana y su naturaleza.
- Proporción de la puzolana en el cementante.
- Cal disponible para reaccionar.
- Área superficial de la puzolana.
- Relación a/mc\* de la mezcla.
- Tiempo y tipo de curado.
- Temperatura de curado.

\*a/mc: Agua/material cementante.

El principal producto de la reacción puzolánica es la fase silicato de calcio hidratado (C-S-H), que es similar al producido en la reacción del agua con el cemento Portland y que contribuye a la resistencia mecánica de las pastas, especialmente a edades avanzadas de hidratación. Parte de los álcalis que participan en la reacción puzolánica y que fueron liberados en la reacción de hidratación quedan absorbidos en la estructura de los C-S-H, lo que también contribuye a disminuir la reacción álcali agregado en el concreto, cuando la puzolana no contiene álcalis, o su contenido es muy bajo.

Al igual que en las pastas de cemento Portland, en la reacción de hidratación de cemento mezclado con puzolanas, se pueden encontrar productos de la reacción muy similares a los encontrados en las pastas de cemento Portland sin puzolanas, la diferencia entre las fases encontradas involucra la variación en la reacción de sus componente y su morfología. Los hidratos encontrados en la pasta endurecida son (Valdez, 2002):

- C-S-H (silicato de calcio hidratado)
- C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub> (hidrato de gelenita)
- Ca(OH)<sub>2</sub> (hidróxido de calcio)
- CaCO<sub>3</sub> (carbonato de calcio)
- C<sub>3</sub>A·3SO<sub>4</sub>Ca·32H<sub>2</sub>O (Etringita)
- Hidratos de aluminato de calcio
- C<sub>3</sub>A·SO<sub>4</sub>Ca·12H<sub>2</sub>O (Monosulfoaluminato)

En el diagrama esquemático del mecanismo de hidratación en sistemas silicato tricalcico (C<sub>3</sub>S)-puzolana (figuras 3), se aprecia como el grano de C<sub>3</sub>S a medida que se combina con el agua forma silicatos de calcio hidratado (C-S-H) y libera Ca. El grano de puzolana conforme adsorbe agua libera álcalis y el hidróxido de calcio liberado por el C<sub>3</sub>S

reacciona con el  $\text{SiO}_2$  de la puzolana para conformar más compuestos de C-S-H y formar una estructura densa y porosa en el concreto.

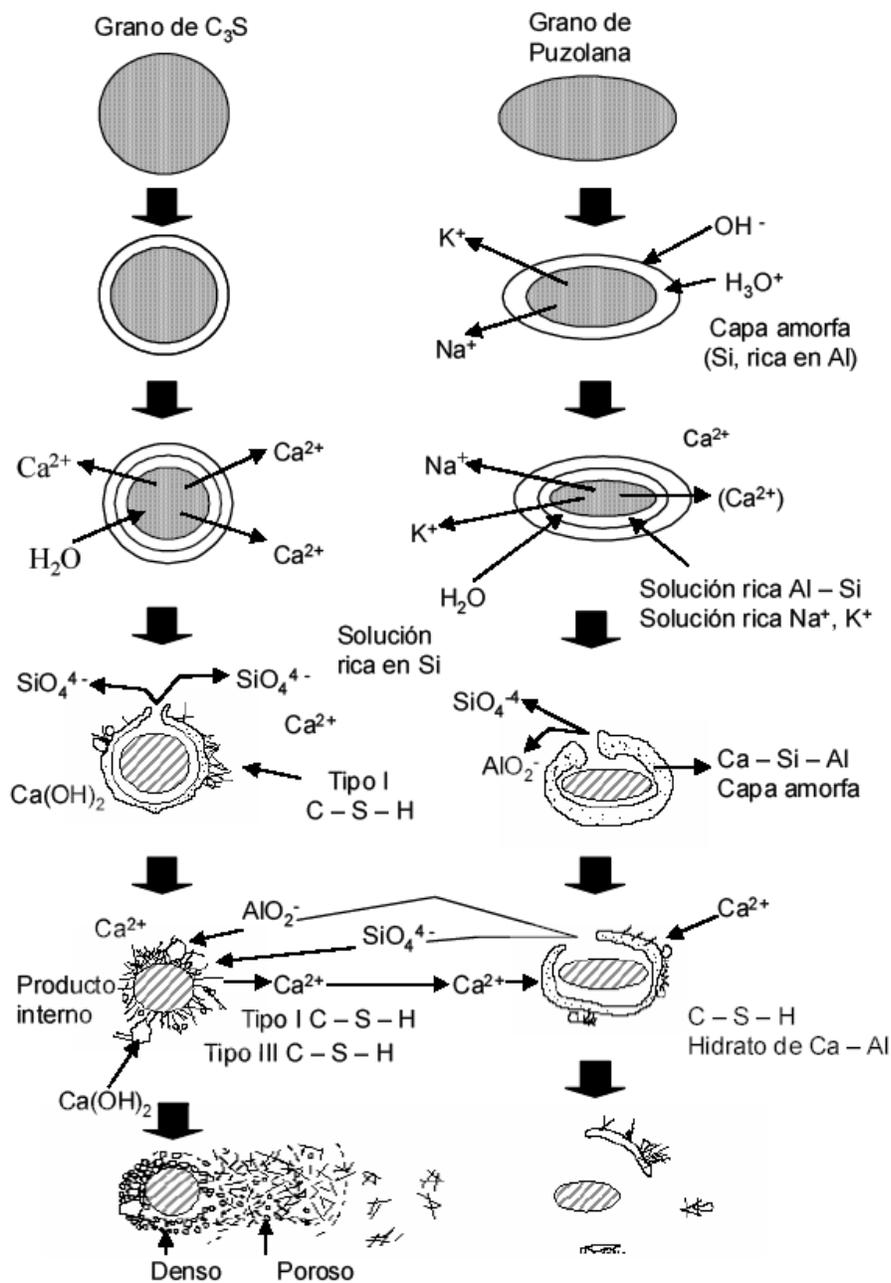


Figura 3. Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas  $\text{C}_3\text{S}$ -puzolanas.  
Fuente: Takemoto y Uchikawa, 1980.

En el diagrama del mecanismo de hidratación de sistemas aluminato tricalcico ( $C_3A$ )-puzolana (figuras 4), se aprecia como el grano de  $C_3A$  a medida que se disuelve en el agua el  $AlO_2$  se combina con el yeso para formar etringita y posteriormente aluminatos de calcio hidratados (C-A-H). El grano de puzolana conforme adsorbe agua libera álcalis para después formar C-S-H y monosulfato hidratado e hidrato de Ca-Al.

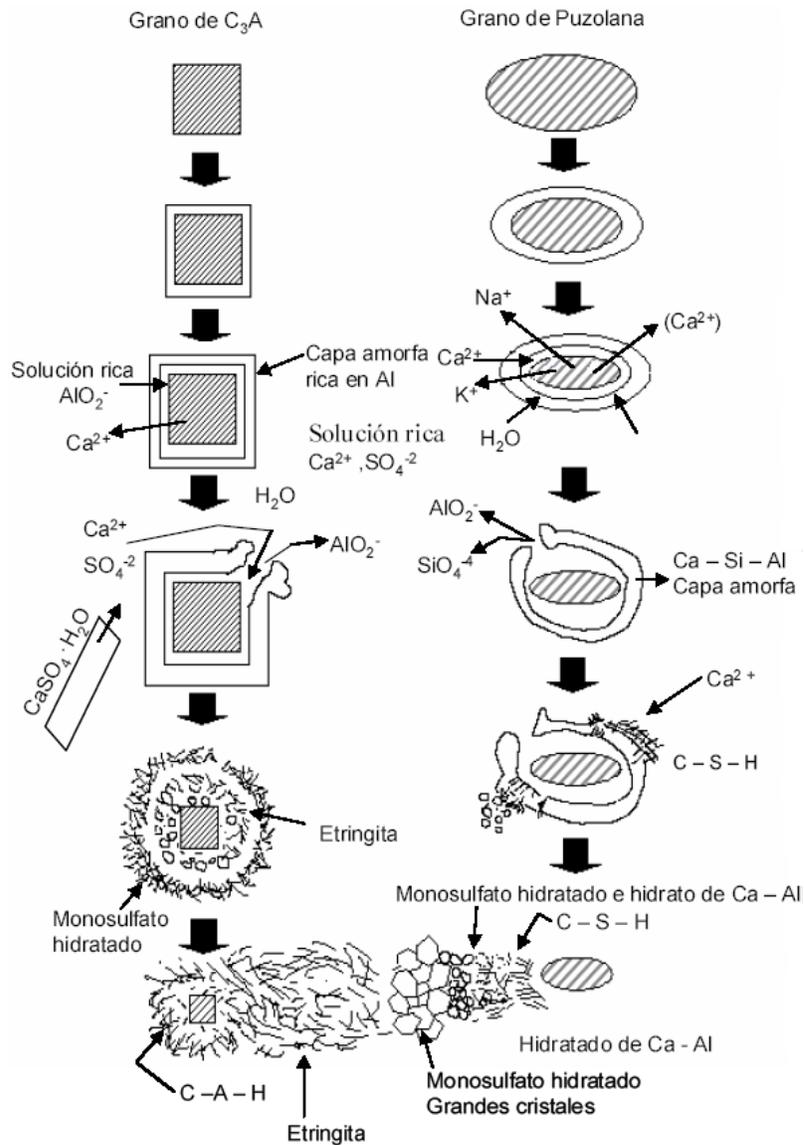


Figura 4. Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas  $C_3A$ -puzolanas, en presencia de yeso e hidróxido de calcio.

Fuente: Takemoto y Uchikawa, 1980.

## 2.6 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Cuando el concreto endurece, requiere de una calidad satisfactoria, esta calidad dependerá principalmente de la impermeabilidad y la resistencia a la compresión del concreto. Siempre se hacen especificaciones en cuanto a la resistencia porqué es relativamente fácil de medir, aunque el “número” que resulta de la prueba no es una medida de su calidad ni de su durabilidad.

Algunas propiedades del concreto endurecido están relacionadas con la resistencia a la compresión, como son: densidad, impermeabilidad, resistencia a la abrasión, resistencia al impacto, resistencia a la tensión, resistencia a los sulfatos. Estas propiedades aumentan la durabilidad del concreto.

La resistencia a la compresión se puede definir como:

La medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto a una edad de 28 días y se le designa con el símbolo  $f_c$ , expresada en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), megapascuales (MPa), o en libras por pulgada cuadrada (Lb/pulg<sup>2</sup> o psi) (Kosmatka, 1992).

Se pueden usar otras edades para las pruebas pero es importante saber la relación entre la resistencia a los 28 días y la resistencia a otras edades. La resistencia a los 7 días se estima como un 75% de la resistencia a los 28 días y las resistencias a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% mayores que las resistencias a los 28 días (Kosmatka, 2004).

Los principales factores que gobiernan la resistencia del concreto son los siguientes: relación agua/materiales cementantes (mc), condiciones de curado (humedad y temperatura), edad, cantidad y características del material cementante, cantidad y características de los agregados, tiempo de mezclado, grado de compactación y el contenido de aire.

Los concretos para uso general tienen una resistencia a compresión entre 200 y 400  $\text{kg}/\text{cm}^2$  o 20 y 40 MPa (3000 y 6000 Lb/pulg<sup>2</sup>).

## 2.7 REOLOGÍA

La reología es la ciencia que trata el flujo de los materiales, incluyendo estudios de deformación del concreto en estado endurecido, el transporte o colocación del concreto en estado fresco, el comportamiento de pastas entre otras (ACI, 2001). La reología describe como se deforma en el tiempo un cuerpo sometido a esfuerzos producidos por fuerzas externas y se puede definir como “el estudio de los cambios en la forma y el flujo de la materia, abarcando elasticidad, viscosidad y plasticidad”. La viscosidad se define como “la fricción interna de un fluido, causada por atracción molecular, la cual provoca una resistencia al flujo”. El manual de concreto ACI (2001) la define como la propiedad del material el cual resiste cambios en la forma o disposición de sus elementos durante el flujo. Los datos de viscosidad funcionan como una “ventana” a través de la cual otras características del material pueden observarse.

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a esfuerzo cortante, sin importar qué tan pequeño sea éste. Los fluidos pueden clasificarse de manera general de acuerdo con la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la relación de deformación. Los fluidos en los cuales el esfuerzo de corte no es directamente proporcional a la relación de deformación son no Newtonianos y por lo común se clasifican con respecto a su comportamiento en el tiempo, es decir, pueden ser independientes del tiempo o dependientes del mismo. Un “fluido” que se comporta como un sólido hasta que se excede el esfuerzo de deformación mínimo y exhibe subsecuentemente una relación lineal entre el esfuerzo y la relación de deformación, se conoce como plástico de Bingham o ideal.

Webster como lo menciona Núñez, define a la reología como el estudio de cambios en forma y el flujo de la materia abarcando la elasticidad, viscosidad y plasticidad.

Existen varias razones fundamentales para justificar el estudio del comportamiento reológico de los materiales, las cuales se mencionan a continuación:

1. Contribuye al conocimiento de su estructura, por ejemplo: existe cierta relación entre el tamaño y la forma molecular de las sustancias en disolución y su viscosidad, así como entre el grado de entrecruzamiento de los polímeros y su elasticidad.

2. En la industria se efectúan con frecuencia medidas reológicas sobre las materias primas y los productos en elaboración que son de gran utilidad para el control de los procesos.
3. Ayuda al diseño de las máquinas; es preciso que tolvas, tuberías y bombas se adecúen a las características de los productos con los que van a hacer utilizadas.

La relación entre la reología de la pasta de cemento y del concreto, no ha sido completamente establecida. Es claro que los cambios en la reología de la pasta de cemento afecta al concreto. Por ejemplo, para incrementar la trabajabilidad se adiciona agua o un reductor de agua de alto rango. Estos materiales afectan principalmente la reología de la pasta de cemento por lo que casi no afectan a los agregados. Por lo tanto, se asume que la correlación entre la pasta de cemento y la reología del concreto puede ser posible (Ferraris, 1999). El comportamiento reológico de un fluido tal como la pasta de cemento, mortero o concreto, frecuentemente son considerados como un fluido tipo Bingham, el cual se caracteriza por el esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica. Para concretos especiales, tales como el concreto autocompactante, debe ser necesario un tercer parámetro que represente correctamente la relación tasa de corte-tensión de corte (Ferraris, 1999).

La mayoría de los materiales manifiestan simultáneamente flujo viscoso y elasticidad, lo cual se le llama viscoelasticidad. Estos materiales se caracterizan por la presencia de una estructura tridimensional incompleta que se destruye por aplicación de un esfuerzo y sólo se recupera parcialmente cuando el esfuerzo es removido. Mientras más completa y resistente a la ruptura es la estructura, más pronunciada es su elasticidad, y mientras más fácil se rompa su estructura, mayor es su comportamiento viscoso.

En el caso de materiales viscoelásticos, una de sus características más importantes es la dependencia del tiempo de la respuesta a ciertos esfuerzos (tensiones) y deformaciones aplicados. Consecuentemente, es necesaria la inclusión del tiempo como una variable independiente para definir adecuadamente sus propiedades viscoelásticas.

De hecho, cuando se mide el comportamiento reológico de estos materiales en un intervalo de esfuerzos o deformaciones se pueden encontrar dos grandes grupos: aquellos considerados como viscoelásticos lineales, en los cuales las propiedades viscoelásticas son una

función del tiempo y no de la magnitud de la deformación ni de la velocidad de deformación. Otra clase de materiales viscoelásticos son los no lineales. Estos exhiben propiedades mecánicas que son una función no sólo del tiempo, sino de la magnitud del esfuerzo aplicado.

### 3.1 MATERIALES

#### 3.1.1 Materiales cementantes y agregados.

Para elaborar las mezclas experimentales requeridas en las pruebas de laboratorio se utilizaron los siguientes materiales:

- Cemento Portland Ordinario (CPO 40) de la marca Holcim Apasco\*.
- Cemento Blanco (CB), de la marca *Cruz Azul*\*.
- Cal grado reactivo con un 95% de pureza de la marca *CTR*.
- Arena sílica estándar (según la norma ASTM C-778 *Specification for Standard Sand*), suministrado por U. S. Sílica Company.

\* Ambos cementos cumplen con la norma NMX-C-414 ONNCCE, vigente a partir del 27 de septiembre del 2004.

#### 3.1.2 Adiciones minerales.

México cuenta con una importante zona volcánica en donde es posible obtener adiciones minerales (materiales puzolánicos), las cuales presentan características similares a las puzolanas artificiales comúnmente utilizadas (ceniza volante, escoria de alto horno, humo de sílice).

Los materiales que se utilizaron en este trabajo para sustituir al cemento Portland en diferentes porcentajes en pastas y morteros realizados en el laboratorio, fueron cuatro diferentes adiciones minerales de origen volcánico (figura 5).

Tres de estos minerales fueron proporcionados por la empresa cementera Holcim Apasco y provienen de una búsqueda geológica nacional. El cuarto material es conocido como “Tepexil” y proviene del estado de Veracruz.

Para su identificación y manipulación, los materiales fueron denominados de la siguiente manera:

- La puzolana de Tecomán, Colima..... PTC
- La puzolana de Apaxco, Estado de México..... PAP
- La puzolana de Perote, Veracruz..... PVR
- La puzolana de Escárcega Macuspana, Tabasco..... PMC

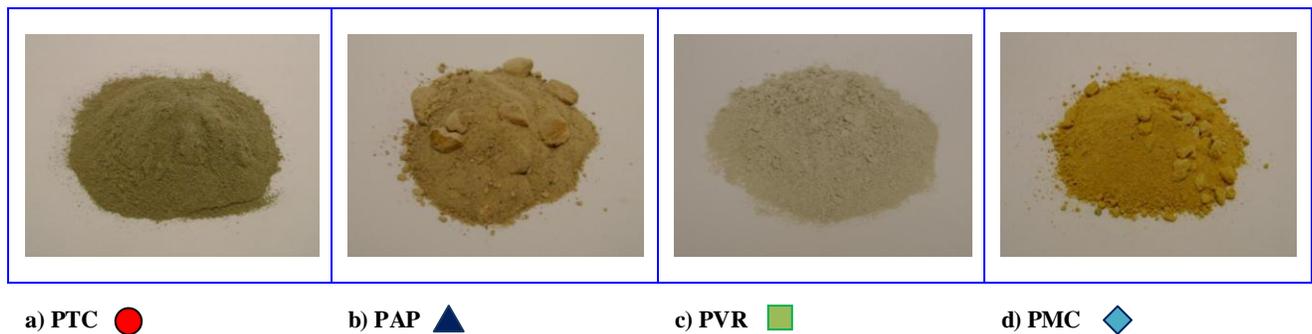
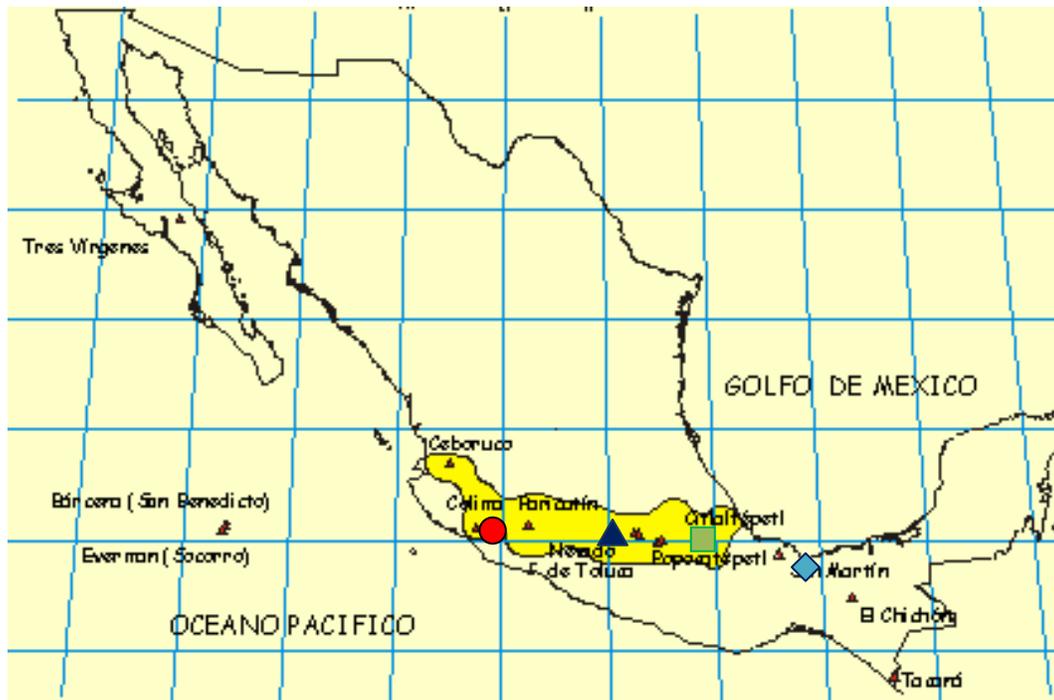


Figura 5. Ubicación de cada uno de los bancos de donde se extrajeron los materiales en estudio.  
a) PTC, b) PAP, c) PVR y d) PMC.

### 3.1.3 Agua.

El agua a utilizar en las mezclas de cemento debe ser agua potable y sin impurezas, según el criterio de aceptación de la ASTM C 94.

## **3.2 MÉTODO**

### **3.2.1 Generalidades.**

A continuación se describe el procedimiento establecido para la parte experimental de este trabajo que contempla cada uno de los materiales de la investigación.

El trabajo se inició con la preparación de los materiales por medios mecánicos, posteriormente se realizó su caracterización física que contempló el estudio de la morfología, fineza, densidad, determinación del área superficial y distribución del tamaño de partículas. Se obtuvieron también las fases cristalinas y amorfas de cada una de las adiciones minerales, así como, su composición química. Finalmente se realizaron los ensayos (pruebas físicas) en pastas y morteros utilizando los materiales cementantes suplementarios en tres porcentajes de sustitución (10, 20 y 30%).

Las pruebas físicas se realizaron para cada uno de los siguientes sistemas:

- Sistema cemento Portland Ordinario – puzolana.
- Sistema Cal – puzolana.
- Sistema Cemento Blanco - puzolana.

La caracterización de los materiales y los ensayos se realizaron de acuerdo a las normas ASTM vigentes y los detalles se describen posteriormente.

La comprensión de la importancia de las propiedades físicas es útil para la interpretación de los resultados de los ensayos de los materiales.

### **3.2.2 Desarrollo experimental.**

A continuación se presenta en forma esquemática el desarrollo experimental realizado en esta investigación (figura 6). Este esquema involucra las cuatro adiciones minerales que se utilizaron, el procedimiento de preparación, las técnicas de caracterización y las pruebas físicas aplicadas en cada uno de los sistemas establecidos previamente.

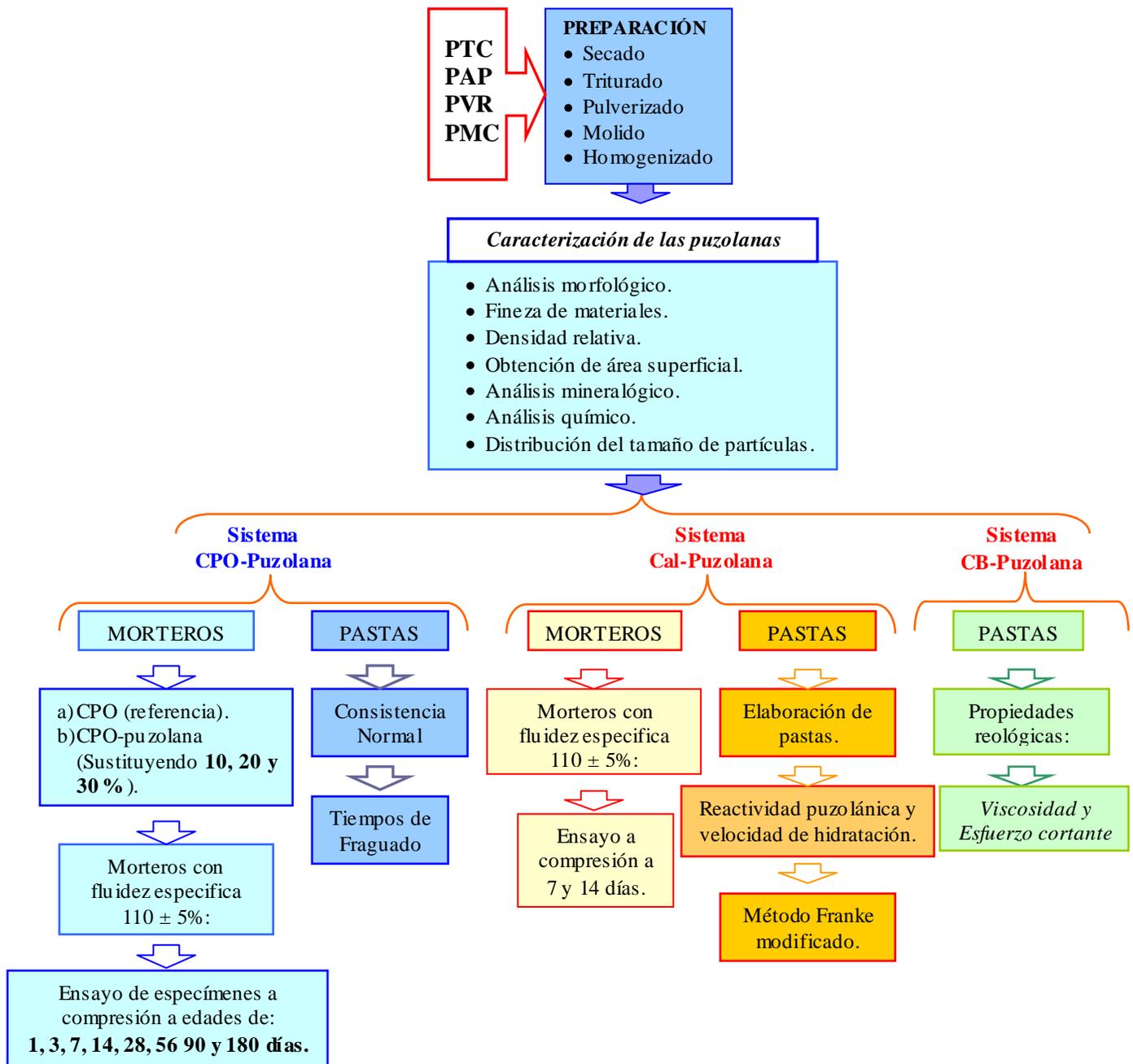


Figura 6. Representación esquemática del desarrollo experimental.

### 3.2.3 Preparación de las adiciones minerales.

Los materiales se prepararon se realizó de la siguiente manera: el material *PVR* se preparó en el laboratorio de materiales y construcción del CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional) Unidad Oaxaca, el material se pulverizó en un molino de rodillos (figura 7a), posteriormente fue tamizado y se recolectó el material que pasó por la malla 200 (75  $\mu\text{m}$ ), posteriormente el producto obtenido se traslado al

Departamento de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL en donde fue molido y homogenizado. La preparación de los materiales PTC, PAP y PMC se realizó completamente en las instalaciones del Departamento de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL con el siguiente proceso:

Primero cada material se secó en un horno (figura 7b) a 110° C por 24 horas. Una vez eliminada el agua libre en cada uno de los materiales se utilizó un triturador de placas (figura 7c) para reducir el tamaño de las piezas grandes, posteriormente se utilizó un pulverizador de discos (figura 7d) para lograr que el material tuviera un tamaño similar, una vez realizado esto, se utilizó un molino vibrador (figura 7e) con bolas de acero, las cuales tenían un tamaño promedio de 1 pulgada. Esta parte de la preparación se realizó moliendo 7.5 kg de material con 75 kg. de bolas de acero en periodos de tiempo de 1 a 2 horas dependiendo de cada material, hasta obtener polvo finamente dividido con un tamaño inferior a 45  $\mu\text{m}$ . Finalmente la homogenización de los materiales se realizó en el molino vibrador en porciones de 15 kg. de material con 5 kg de bolas de acero durante 15 minutos.



a) Molino de rodillos.



b). Horno.



c). Triturador.



d). Pulverizador.



e). Molino vibrador.

Figura 7. Equipo utilizado para la preparación de las adiciones minerales.

### 3.2.4 Caracterización de las adiciones minerales.

Para la caracterización de las adiciones minerales, se consideraron las siguientes pruebas:

- Análisis morfológico.
- Obtención de la fineza.
- Densidad relativa.
- Área superficial.
- Análisis mineralógico.
- Análisis químico.
- Distribución del tamaño de partículas.

#### 3.2.4.1 Análisis morfológico.

Se realizó un análisis morfológico de cada uno de los materiales obteniendo imágenes por medio de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) marca *JEOL*, modelo *JSM-6490LV* (figura 8).



Figura 8. Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).

Las muestras fueron preparadas utilizando un recubrimiento de oro con un equipo *DENTON VACUUM Desk IV* (figura 9), esto con el fin de lograr el barrido de electrones sobre las muestras y realizar el análisis de su morfología.



Figura 9. Equipo recubridor de muestras.

### 3.2.4.2 Determinación de fineza de los materiales.

Se obtuvo la fineza de cada uno de los materiales siguiendo el método que indica la norma ASTM C 430-96 (Reapproved 2003) *Standard Test Method for fineness of Hydraulic Cement by the 45- $\mu\text{m}$  (No. 325) Sieve*, (figura 10).



Figura 10. Malla 325 (45  $\mu\text{m}$ ).

### 3.2.4.3 Determinación de densidades de las puzolanas.

Se obtuvo la densidad de cada uno de los materiales según la norma ASTM C 188-95 *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*.

La densidad de cada material fue obtenida utilizando las cantidades de material indicadas en la tabla 5.

Tabla 5. Cantidad de materiales utilizada para obtener densidades.

Material	Puzolana gramos	Lectura inicial, L1	Lectura final, L2
PTC-1	55.00	0.60	19.70
PTC-2	55.00	0.80	19.90
PAP-1	55.00	0.50	22.40
PAP-2	50.00	0.70	20.60
PVR-1	50.00	0.50	20.25
PVR-2	50.00	0.55	20.50
PMC-1	52.00	0.65	20.50
PMC-2	52.00	0.55	20.50

Estos datos fueron aplicados en la fórmula 4, y los valores obtenidos fueron utilizados en el diseño de mezclas de morteros y pastas cal-puzolana.

$$Densidad\ relativa = \frac{masa\ del\ material\ (g)}{volumen\ desplazado\ (cm^3)} \dots\dots\dots(5)$$

Donde:

- Volumen desplazado en el matraz de Le Chatelier = L2 - L1
- L1 = Lectura Inicial del liquido en el matraz (sin el material).
- L2 = Lectura final del liquido en el matraz (con el material).

#### 3.2.4.4 Determinación del área superficial por adsorción de nitrógeno (BET).

Las áreas superficiales de los cuatro materiales fueron obtenidas en un equipo de adsorción de nitrógeno marca *Quantachrome* modelo *NOVA 2000e* (figura 11).



Figura 11. Equipo de adsorción de nitrógeno.

El método básico de medición de área superficial (Método BET) implica la determinación de la cantidad de un gas inerte, normalmente nitrógeno ( $N_2$  como adsorbato), requerido para formar una capa con un espesor mono molecular sobre la superficie de una muestra a temperatura criogénica. El área de la muestra se calcula luego utilizando el área conocida (a partir de otras consideraciones) a ser ocupada por cada molécula de nitrógeno en esas condiciones.

Clásicamente, las mediciones necesarias son llevadas a cabo utilizando una muestra evacuada encerrada en una cámara y enfriada en un baño de nitrógeno líquido al cual se admite la entrada de cantidades conocidas de nitrógeno gaseoso. La medición de la presión de gas y los cambios de presión permiten determinar el punto en el cual se forma la monocapa. Estos datos establecen también el volumen de gas que compone la monocapa, y en consecuencia el número de moléculas. Un cálculo directo da luego el área superficial de la muestra. Un aspecto deseable de esta técnica es que sólo incluye mediciones fundamentales de fuerza y longitud (volumen). No hace falta calibración con la ayuda de patrones de referencia.

#### **3.2.4.5 Análisis mineralógico por difracción de rayos X.**

Se realizó un análisis mineralógico por Difracción de Rayos-X (DRX) para determinar las diferentes fases minerales cristalinas y amorfas de los cuatro materiales.

Este método se basa en la interacción entre los rayos X y la materia cristalina que produce la difracción. Así pues, cuando la radiación incide sobre una estructura cristalina se produce la difracción del haz cuando se cumple la ley de Bragg ( $n\lambda=2d \sin \theta$ ), y manteniendo la  $\lambda$  de la radiación incidente y  $n$  constantes se pueden determinar variaciones en el espacio entre planos reticulares, o bien en el ángulo de difracción. Las muestras se tomaron del material previamente preparado y se colocaron en los portamuestras. La muestra es irradiada con rayos X de una determinada longitud de onda y la muestra y detector girarán simultáneamente cambiando el ángulo, así, a medida que los diferentes planos se ajustan a la ley de Bragg se produce la difracción. Los análisis fueron realizados en un equipo marca *Bruker axs* modelo *D8 ADVANCE* (figura 12) utilizando la técnica de polvos obtenidos como se mencionó anteriormente.



Figura 12. Equipo de difracción de rayos X.

#### 3.2.4.6 Análisis químico.

Este análisis se realizó para conocer la composición de cada una de las adiciones minerales así como del cemento Portland, pero principalmente para conocer el porcentaje de óxidos mayores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en cada uno de las adiciones minerales.

El análisis se realizó mediante Fluorescencia de Rayos-X (FRX). La FRX se basa en bombardear la muestra con rayos X (radiación primaria), éstos excitan los átomos, que al volver a su estado inicial, emiten rayos X (radiación secundaria) de longitudes de onda determinadas. La FRX se emplea normalmente, cuando se quiere conocer con rapidez la composición elemental de una sustancia. Mediante esta técnica es posible determinar los elementos desde el Flúor hasta el Uranio, en muestras sólidas, en polvos y en líquidos. Asimismo, mediante la utilización de los patrones adecuados es posible realizar un análisis cuantitativo de los elementos presentes. Los análisis de FRX se realizaron en el laboratorio de la empresa cementera “CEMEX” en Monterrey Nuevo León. Para ello se elaboraron pastillas que fueron analizadas por medio de un equipo de fluorescencia de rayos X marca *Bruker* modelo *S4 PIONEER* (figura 13).



Figura 13. Equipo de fluorescencia de rayos X.

#### **3.2.4.7 Determinación del tamaño promedio de partículas.**

Se determinó el tamaño promedio de partículas de las cuatro adiciones minerales por vía seca utilizando difracción de rayo láser en un equipo marca *Malvern, Modelo Mastersizer 2000* (figura 14).

Éste equipo determina el tamaño de partículas entre un rango de 0.1 a 1000  $\mu\text{m}$ .



Figura 14. Equipo de difracción de rayos láser.

### 3.2.5 Experimentación en sistemas cemento Portland ordinario-puzolana.

#### 3.2.5.1 Reactividad puzolánica en morteros CPO-puzolana.

Se realizaron un total de 13 mezclas diferentes, una de control y tres mas para cada uno de los materiales suplementarios sustituyendo un 10, 20 y 30% del material cementante (ver tabla 6), de las cuales se elaboraron morteros con una fluidez  $110 \pm 5\%$  según la norma ASTM C 109-02 *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*.

Se elaboraron 24 especímenes cúbicos de 5 cm. por mezcla con el objetivo de determinar la resistencia mecánica a la compresión, la cual fue obtenida de un promedio de 3 especímenes ensayados.

Tabla 6. Variables del experimento (morteros CPO-puzolana).

Edad (días)	Muestra Control	PTC			PAP			PVR			PMC		
		Sustitución			Sustitución			Sustitución			Sustitución		
		10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
14	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
28	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
56	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
90	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
180	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Las mezclas de los morteros CPO-puzolana fueron elaborados con la dosificación que se presenta en la tabla 7, y con el equipo que establece la norma ASTM C 109-02 (figuras 15 y 16), cumpliendo con una fluidez de  $110 \pm 5\%$ , posteriormente fueron curados en forma estándar a  $23 \pm 2$  °C, hasta la fecha de su ensaye, siendo estas a las edades de 1, 3, 7, 14, 28, 56, 90 y 180 días.

Tabla 7. Dosificación para 3 especímenes de mortero CPO-puzolana

Material	CT*			PTC			PAP			PVR			PMC	
Sustitución, %	0	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	
Puzolana, g	0	21	42	63	21	42	63	21	42	63	21	42	63	
CPO**, g	210	189	168	147	189	168	147	189	168	147	189	168	147	
Arena, g	577.5	577.5	577.5	577.5	577.5	577.5	577.5	577.5	577.5	577.5	577.5	577.5	577.5	
A / MC***	0.52	0.52	0.525	0.53	0.52	0.52	0.515	0.52	0.53	0.55	0.54	0.58	0.60	
Agua, g	109.2	109.2	110.3	111.3	109.2	109.2	108.2	109.2	111.3	115.5	113.4	121.8	126	
Fluidez, %	110	110.5	114.3	113.5	111.8	106.5	110	107	108.5	109.5	106.5	115	114.5	

\* CT: Muestra control.

\*\* CPO: Cemento Portland ordinario.

\*\*\* A / CM: Relación agua / material cementante.



Figura 15. Mezcladora y báscula digital.



Figura 16. Moldes para cubos de 5 cm<sup>3</sup>.

### 3.2.5.2 Consistencia normal y tiempo de fraguado en pastas cemento-puzolana.

Para determinar la cantidad de agua necesaria para la consistencia normal en pastas de cemento-puzolana se siguió el método descrito en la norma ASTM C 187-98 *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*.

Esta prueba se realizó utilizando los equipos descritos en la norma ASTM C 305-99 *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*.

En la tabla 8 se muestran la dosificación necesaria para obtener una consistencia normal de  $10 \pm 1$  mm en pastas de CPO con los diferentes porcentajes de sustitución de los materiales.

Tabla 8. Dosificación para obtener la Consistencia Normal.

Material	Dosificación				CN** (mm)
	Cemento (g)	Puzolana (g)	A/MC*	Agua (g)	
CPO	650	0	0.295	191.75	11.0
PTC 10%	585	65	0.275	178.75	10.5
PTC 20%	520	130	0.27	175.5	11.0
PTC 30%	455	195	0.27	175.5	10.5
PAP 10%	585	65	0.27	175.5	9.0
PAP 20%	520	130	0.27	175.5	9.5
PAP 30%	455	195	0.28	182.0	9.5
PVR 10%	585	65	0.285	182.25	9.0
PVR 20%	520	130	0.295	191.75	9.0
PVR 30%	455	195	0.315	204.75	10.0
PMC 10%	585	65	0.3	195	9.0
PMC 20%	520	130	0.305	198.25	9.0
PMC 30%	455	195	0.31	201.5	10.5

\* A/MC: Relación agua / material cementante.

\*\* CN: Consistencia normal.

Una vez obtenida la consistencia normal de la pasta de cemento, se determinaron los tiempos de fraguado inicial y final Vicat. Esta prueba consiste en la determinación del tiempo

que pasa desde el momento de la adición del agua hasta que la pasta deja de tener fluidez y de ser plástica (fraguado inicial) y del tiempo requerido para que la pasta adquiriera un grado de endurecimiento (fraguado final), esta toma de tiempo se realiza mediante la resistencia a la penetración con el aparato de Vicat (figura 17) y de acuerdo a lo que indica la norma ASTM C 191-01 *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat*.



Figura 17. Aparato de Vicat.

### **3.2.6 Diseño de experimento en sistemas cal-puzolana.**

#### **3.2.6.1 Reactividad puzolánica en morteros cal-puzolana.**

Se elaboraron morteros cal-puzolana según la norma ASTM-C 109-99 para determinar su resistencia mecánica a 7 y 14 días y conocer su reactividad puzolánica. Los morteros se fabricaron con proporción de una parte de cal por nueve de arena estándar granulada, más una cantidad de puzolana igual a dos veces el peso de la cal multiplicado por un factor obtenido de dividir la densidad del complemento cementante entre la densidad de la cal, esto según la norma ASTM C 311-93 *Standard Test Method for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete*.

La tabla 9 muestra las dosificaciones y la relación agua/material cementante necesaria para alcanzar una fluidez de  $110 \pm 5\%$  con la que se elaboraron los morteros cal-puzolana.

Tabla 9. Proporción para mezclas de morteros cal-puzolana.

Puzolana	Material	Densidad	Partes	Densidad media	Masa p/3 cubos*, g	A/MC**
PTC	Arena***	2.65	9.00	1.91	741.73	0.585
	Ca (OH) <sub>2</sub>	2.30	1.00	0.18	82.41	
	Puzolana	2.88	2.50	0.58	206.4	
	Total		12.50	2.67	1030.54	
PAP	Arena***	2.65	9.00	1.96	740.81	0.60
	Ca (OH) <sub>2</sub>	2.30	1.00	0.19	82.31	
	Puzolana	2.51	2.18	0.45	179.66	
	Total		12.18	2.60	1002.78	
PVR	Arena***	2.65	9.00	1.96	740.78	0.68
	Ca (OH) <sub>2</sub>	2.30	1.00	0.19	82.31	
	Puzolana	2.52	2.19	0.45	180.36	
	Total		12.19	2.60	1003.45	
PMC	Arena***	2.65	9.00	1.94	740.63	0.81
	Ca (OH) <sub>2</sub>	2.30	1.00	0.19	82.29	
	Puzolana	2.62	2.28	0.49	187.48	
	Total		12.28	2.62	1010.40	

\* Se consideró un 5% de desperdicio.

\*\*A/MC = Relación agua/material cementante

\*\*\* Arena estándar conforme a ASTM C-778-00.

Los moldes conteniendo el mortero fueron sellados herméticamente y recibieron un curado estándar por  $24 \pm 2$  horas a  $23 \pm 1.7$  °C, después de esto, fueron almacenados en un ambiente húmedo a  $55 \pm 1.7$  °C como lo indica la norma ASTM C 114-01 hasta cumplir con las edades de 7 y 14 días. Una vez que los especímenes (figura 18) alcanzaron las edades requeridas se dejaron enfriar por  $4 \pm \frac{1}{4}$  horas a  $23 \pm 1.7$  °C en el laboratorio en un ambiente fresco y seco para poder realizar el ensayo de resistencia a la compresión (figura 19).

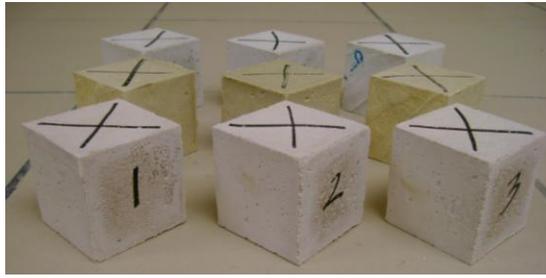


Figura 18. Especímenes de mortero cal-puzolana.



Figura 19. Ensayo de especímenes.

### 3.2.6.2 Reactividad puzolánica en pastas de cal-puzolana.

Para evaluar la reactividad puzolánica de los materiales, se elaboraron pastas con la proporción utilizada en la elaboración de los morteros, posteriormente se determinó el contenido de cal libre siguiendo el método de prueba alternativo A (Franke Modificado) descrito en la norma ASTM C 114-01 *Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement; Free Calcium Oxide*, esta prueba consiste en la extracción química del hidróxido de calcio, de pastas de cal-puzolana.

Las pastas fueron elaboradas y colocadas en doble bolsa de polietileno, el curado que recibieron fue estándar a  $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$  por  $24 \pm 2$  horas, posteriormente el curado se continuó en un ambiente húmedo a  $55 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$  hasta completar las edades de 1, 3, 7, 14 y 21 días, una vez cumplidas las edades, las pastas se sacaron del ambiente húmedo y se dejaron enfriar por  $4 \pm 1/4$  horas a  $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ , después se molieron y se sobresaturaron con acetona para detener la hidratación, se secaron a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  por 15 minutos de donde se tomó una muestra de 0.500 g. del material finamente dividido para mezclarlo en una solución de etilo-acetoacetato en

alcohol isobutílico como solvente, la solución se llevó a ebullición por 15 minutos (figura 20), después fue enfriada y filtrada utilizando papel filtro wathman #41 y una bomba de vacío (figura 21), finalmente el líquido filtrado se tituló con una solución de ácido perclórico para determinar la cal remanente.



Figura 20. Ebullición.



Figura 21. Filtración.

### **3.2.7 Diseño de pastas en sistemas cemento blanco-puzolana.**

#### **3.2.7.1 Propiedades reológicas en pastas cemento-puzolana.**

Esta prueba se realizó para conocer cómo afecta el uso de los materiales puzolánicos a las propiedades reológicas de una pasta de cemento como puede ser la viscosidad de la pasta,

esto se realizó reemplazando las mismas proporciones de cemento con puzolana utilizadas en las pruebas de reactividad con cemento Portland Ordinario.

Esta parte de la investigación se llevó a cabo en el laboratorio de materiales y construcción del CIIDIR Oaxaca, y para ello se requería utilizar un cemento ordinario, y debido a que en el estado solo es posible adquirir cemento Portland puzolánico y cemento blanco, se optó por utilizar un cemento blanco el cual cuenta con características similares a las de un cemento ordinario ya que no tiene algún tipo de puzolana en su composición.

Para realizar esta prueba, se elaboraron pastas de cemento blanco-puzolana con una relación agua-cemento de 0.5. Las pastas se realizaron en una mezcladora portátil, el mezclado de los materiales se realizó en 3 periodos de 1.5 minutos hasta completar 4.5 minutos, para obtener un mezclado homogéneo en cada pasta elaborada.

La tabla 10 muestra las dosificaciones utilizadas para 500 mL. de muestra necesaria para realizar 1 prueba.

Tabla 10. Proporción para pastas cemento blanco-puzolana.

Material	CB	CB+PTC			CB+PAP			CB+PVR			CB+PMC		
Sustitución, %	0	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Puzolana, g	0	60	120	180	60	120	180	60	120	180	60	120	180
CPO, g	600	540	480	420	540	480	420	540	480	420	540	480	420
Agua, g	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300

Estas pruebas se llevaron a cabo en un reómetro de la marca *Antón Paar*, modelo *Physica MCR-301* (figuras 22 y 23), y se realizaron utilizando una geometría *Ball Measuring System BM15*, la cual es la de mayor tamaño en el reómetro y la más apta realizar pruebas a muestras con las características de una mezcla de cemento.



Figura 22. Reómetro.



Figura 23. Pastas CB-puzolana.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS ADICIONES MINERALES.

#### 4.1.1 Análisis morfológico (MEB).

En las siguientes imágenes se aprecian las características morfológicas de los materiales, estas imágenes se obtuvieron con un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y fueron tomadas de muestras del material en greña, en ellas se aprecian pequeñas partículas conglomeradas, las cuales no muestran porosidad (figura 24).

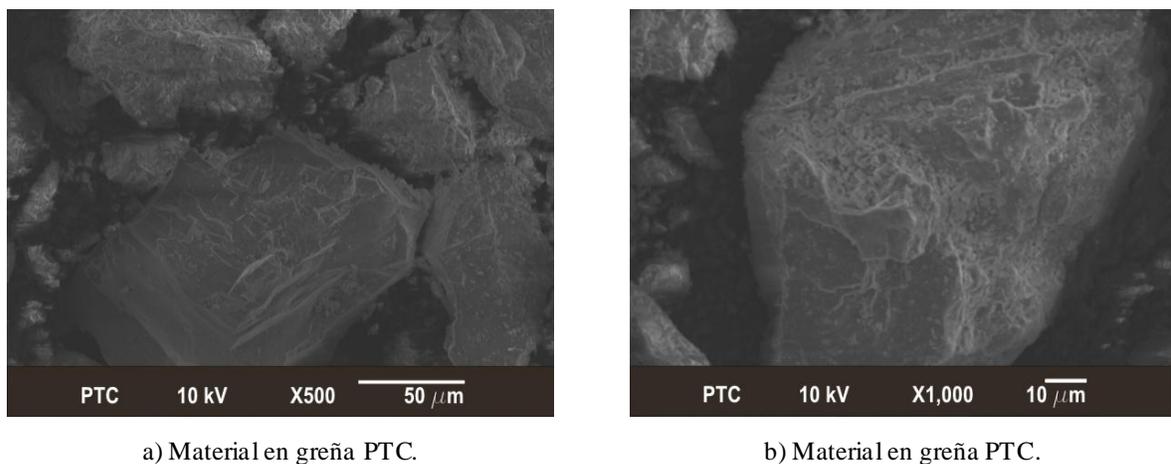


Figura 24. Imágenes del material en greña (PTC).

En las imágenes tomadas del material molido, se aprecia que las partículas de mayor tamaño presentan fallas concoidales típicas de los vidrios volcánicos (figuras 25).

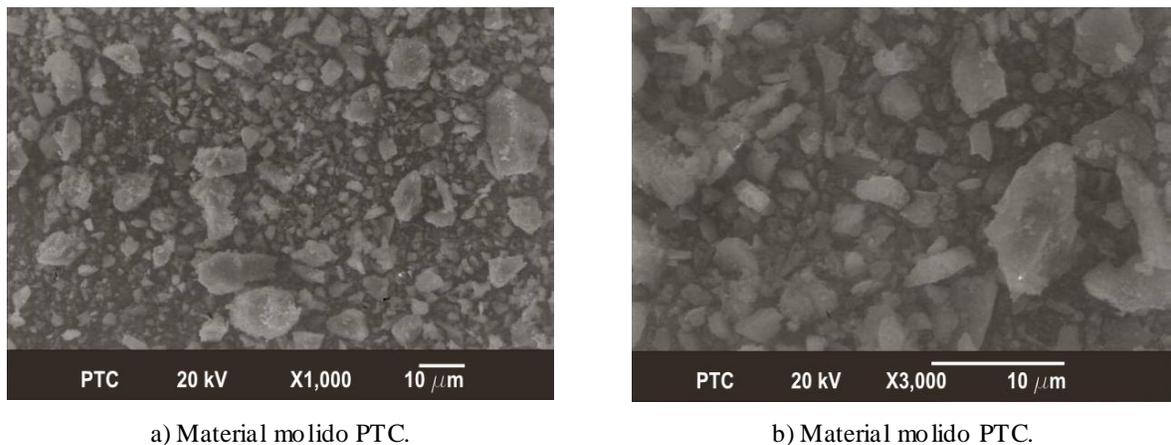
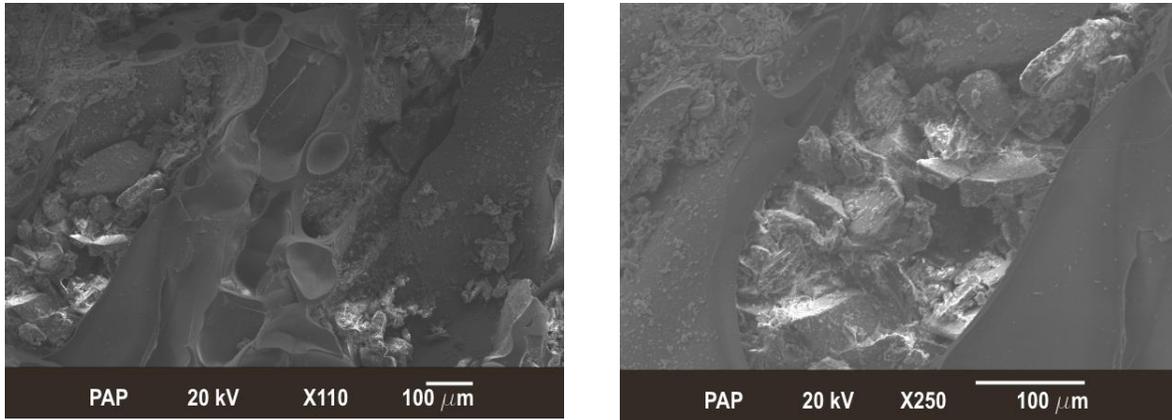


Figura 25. Imágenes del material molido (PTC).

El material **PAP** es ligero y poroso, y como se aprecia en las imágenes tomadas del material en greña dentro de los poros se observan partículas conglomeradas, así como pequeñas partículas adheridas a las paredes de las piezas de mayor tamaño (figuras 26).

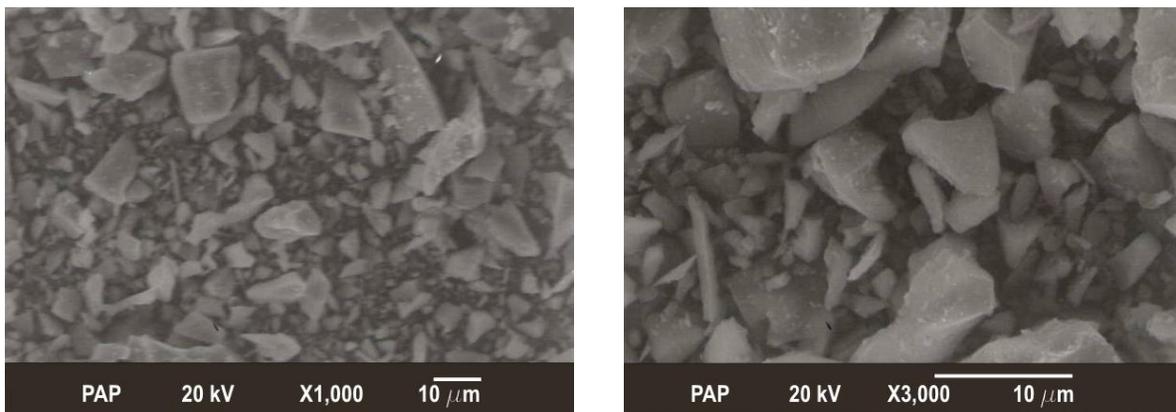


a) Material en greña PAP.

b) Material en greña PAP.

Figura 26. Imágenes del material en greña (PAP).

Después de la molienda el material **PAP** no presenta porosidad, a diferencia de las partículas de mayor tamaño del material en greña, sin embargo, se observan partículas angulares con forma de pequeñas lascas las cuales también presentan fallas concooidales debido a la molienda del material (figuras 27).



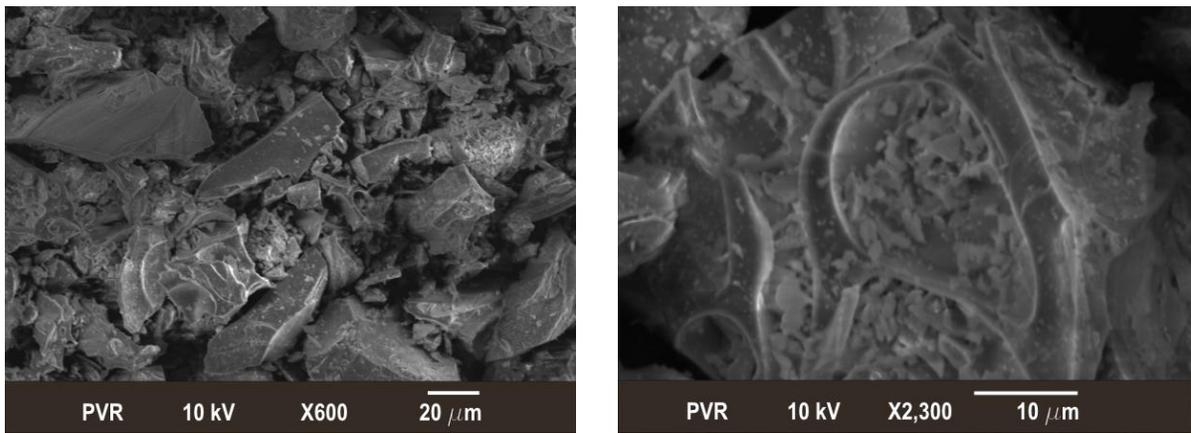
a) Material molido PAP.

b) Material molido PAP.

Figura 27. Imágenes del material molido (PAP).

En las siguientes imágenes tomadas del material en greña **PVR**, se observa que este material presenta mayores formas características de los vidrios volcánicos como son fallas

concooidales, esto debido al vidrio de alta relación sílice/alúmina, además de partículas pequeñas conglomeradas en los poros del material (figuras 28).

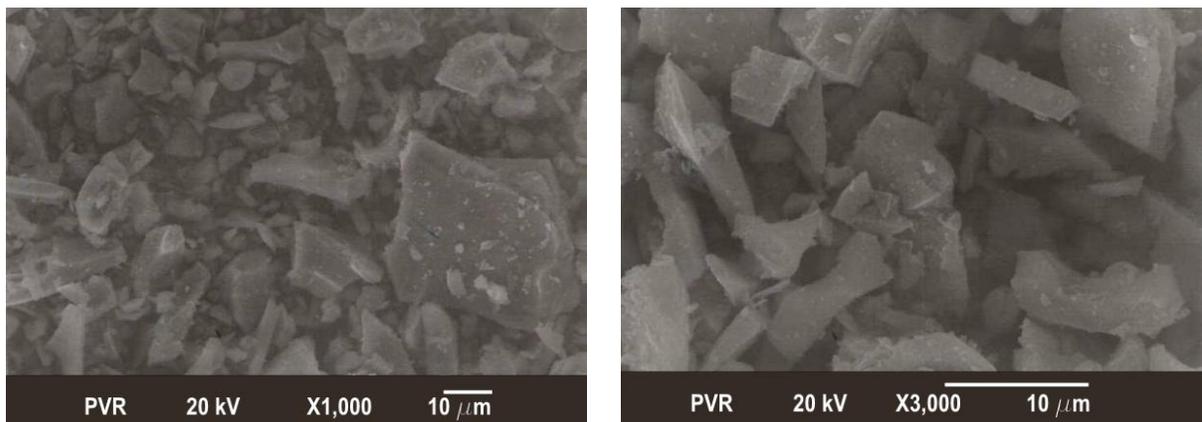


a) Material en greña PVR.

b) Material en greña PVR.

Figura 28. Imágenes del material en greña (PVR).

En la figura 29 se presentan las microfotografías del material molido **PVR**, la forma del material es de pequeñas partículas de vidrio, este material es el que presenta mayores características de un material de origen volcánico por las formas angulares que se observan aún después de la molienda del material, lo que indica que es un vidrio volcánico.

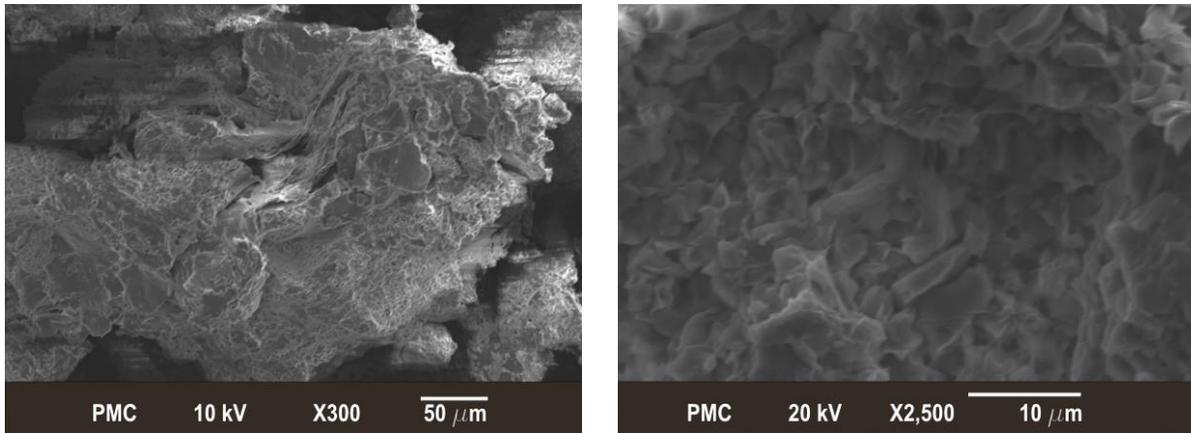


a) Material molido PVR.

b) Material molido PVR.

Figura 29. Imágenes del material molido (PVR).

En las siguientes imágenes tomadas del material **PMC** en greña, se aprecia que es un conglomerado heterogéneo, y al analizar uno de los conglomerados, se observa que las partículas de menor tamaño presentan pequeñas fallas concooidales (Figura 30).

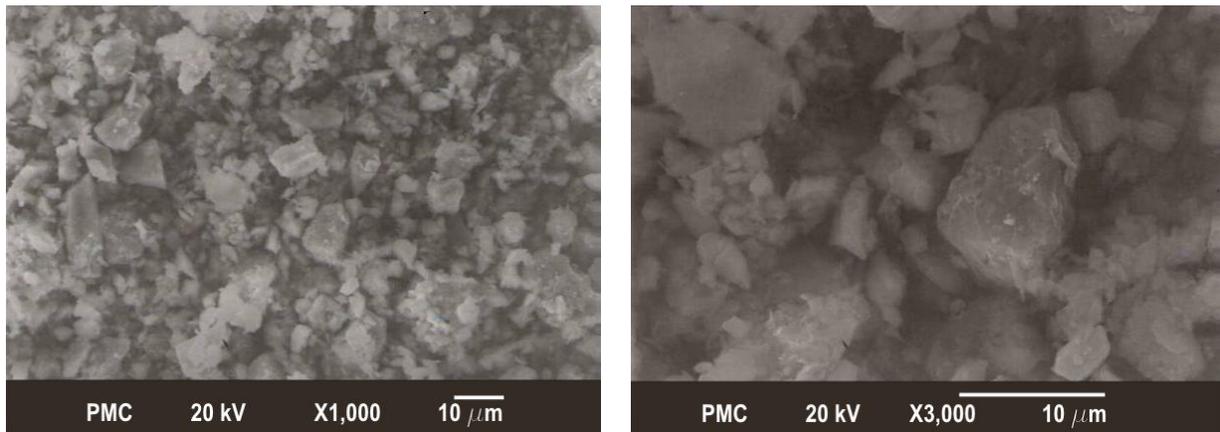


a) Material en greña PMC.

b) Material en greña PMC.

Figura 30. Imágenes del material en greña (PMC).

Después de la molienda, el material *PMC* presenta partículas con un tamaño promedio de 10  $\mu\text{m}$  y las partículas de menor tamaño forman pequeños conglomerados (figura 31). Este material es el que presenta menos formas angulares con respecto a los otros materiales, lo que puede influir en la trabajabilidad al momento de elaborar las mezclas.



a) Material molido PMC.

b) Material molido PMC.

Figura 31. Imágenes del material molido (PMC).

#### 4.1.2 Fineza por la malla 325 (45 $\mu\text{m}$ ).

Es muy importante que las puzolanas o adiciones minerales se encuentren finamente divididas, ya que solo de esta forma el sílice se puede combinar con el hidróxido de calcio  $\{\text{Ca}(\text{OH})_2\}$  liberado durante la hidratación del cemento Portland para formar silicatos de calcio estables, los cuales tiene propiedades cementantes (Neville 1999). Siguiendo esto y

tomando en consideración que la fineza es una propiedad muy importante del cemento, la molienda aplicada a las cuatro adiciones minerales se realizó con la finalidad de que los materiales tuvieran un tamaño similar a la fineza del cemento Portland, es decir, que el porcentaje de material que pasará por la malla 325 se encontrara cerca del rango de 92.9% y 97.1% que indica la norma ASTM 430.

Como se muestra en la tabla 11, la fineza de las adiciones minerales se encuentra entre el 92.5 y el 97.3 %, siendo el material PAP el material ligeramente mas grueso y el material PTC el más fino, por lo tanto la fineza obtenidas de los materiales después de la molienda cumplen con los parámetros establecidos al inicio de la investigación.

Tabla 11. Fineza de los materiales.

<b>Material</b>	<b>% que pasó la malla 325 (45 <math>\mu</math>m)</b>
PTC	97.3
PAP	92.5
PVR	94.6
PMC	93.3

#### **4.1.3 Área superficial (BET).**

Para un cemento Portland, cuando la fineza aumenta, el área superficial también aumenta, acelerando el proceso de hidratación, como lo sugiere Celik *et al* (2007), en su investigación donde estudia la influencia de las técnicas de molienda en las propiedades del cemento, analizando principalmente la fineza, el tamaño de partículas y el área superficial. Por tal motivo es importante conocer el área superficial de las puzolanas y saber cómo afectan estas características en la hidratación y propiedades mecánicas a las mezclas de esta investigación. Las áreas superficiales de las adiciones minerales obtenidas por adsorción de nitrógeno (método BET), aparecen en la tabla 12.

Tabla 12. Área superficial por BET.

<b>Material</b>	<b>m<sup>2</sup>/g</b>
PTC	5.50
PAP	13.64
PVR	60.00
PMC	7.81

De acuerdo a los resultados de área superficial (tabla 12), no existe relación con la fineza de las adiciones minerales, ya que a pesar de que los materiales se prepararon con una fineza similar, el área superficial es muy diferente en cada una de las adiciones. Sin embargo es probable que exista una relación entre el área superficial y la reactividad puzolánica, lo que sugeriría que entre mayor sea el área superficial de un material puzolánico, mayor será el área de contacto y por consiguiente su reactividad puzolánica con el hidróxido de calcio  $\{Ca(OH)_2\}$ , lo que se manifiesta en un incremento en la resistencia a la compresión.

El material PVR y el PAP presentaron las mayores áreas superficiales, 60.00 m<sup>2</sup>/g y 13.64 m<sup>2</sup>/g respectivamente, esto puede ser debido la porosidad de estos dos materiales, lo que hace que adsorban más nitrógeno durante el desarrollo de la prueba BET.

#### 4.1.4 Densidad.

La densidad de las adiciones minerales se utilizó para diseñar las mezclas para las pruebas de reactividad con la cal, y conocer la reactividad puzolánica de cada una de las adiciones minerales. Los resultados de densidad relativa de las adiciones minerales aparecen en la tabla 13.

Tabla 13. Densidad de las adiciones minerales.

Material	L <sub>1</sub> *, cm <sup>3</sup>	L <sub>2</sub> *, cm <sup>3</sup>	Resultado	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Promedio g/cm <sup>3</sup>
PTC-1	0.60	19.70	2.8795	2.88	<b>2.88</b>
PTC-2	0.80	20.00	2.8795	2.88	
PAP-1	0.50	22.40	2.5114	2.51	<b>2.51</b>
PAP-2	0.70	20.60	2.5125	2.51	
PVR-1	0.50	20.25	2.5316	2.53	<b>2.52</b>
PVR-2	0.55	20.50	2.5062	2.51	
PMC-1	0.65	20.50	2.6196	2.62	<b>2.62</b>
PMC-2	0.55	20.50	2.6065	2.61	

\*L1: Lectura inicial del matraz.

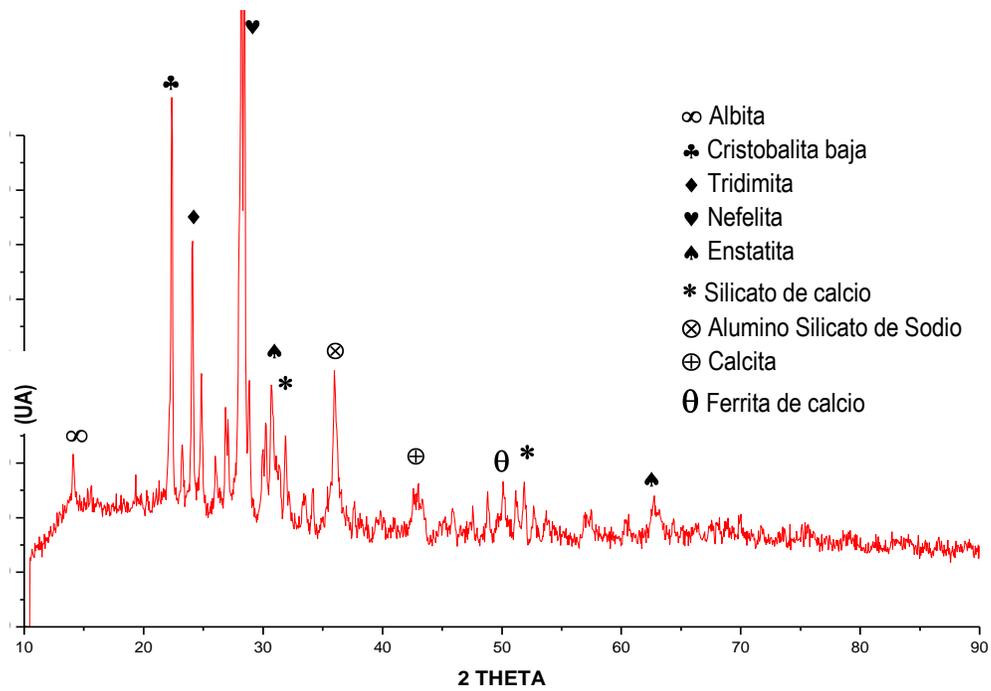
\*\*L2: Lectura final del matraz.



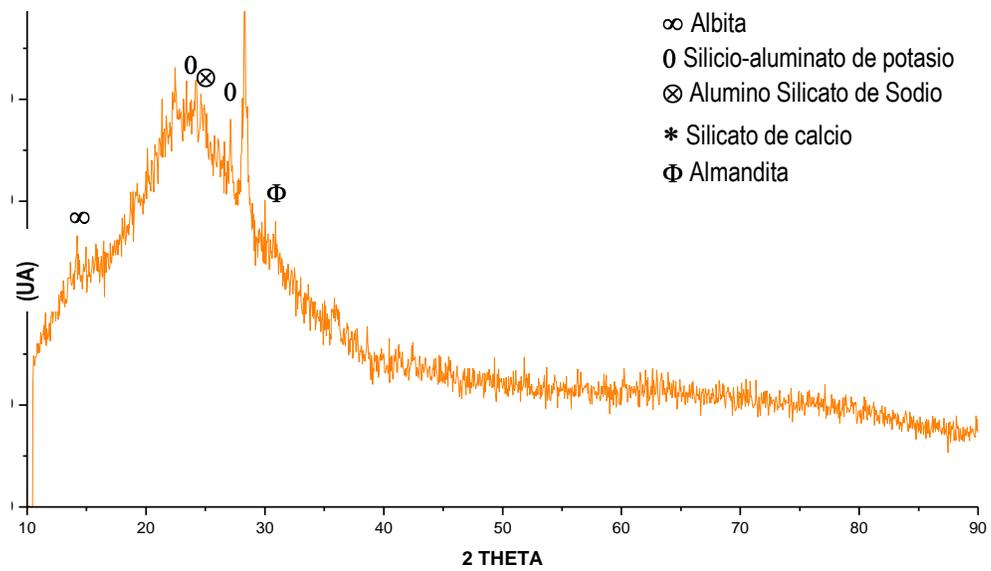
Como es posible analizar en las gráficas 1, 2, 3 y 4, a pesar de que las cuatro adiciones minerales cuentan con altas concentraciones de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (como se muestra en el análisis químico), es también importante conocer, las fases reactivas que se encuentran en cada uno de los materiales así como su estructura interna, para comparar estas características con la resistencia a la compresión que se obtuvo en los morteros producidos.

Tabla 16. Fases minerales de los materiales.

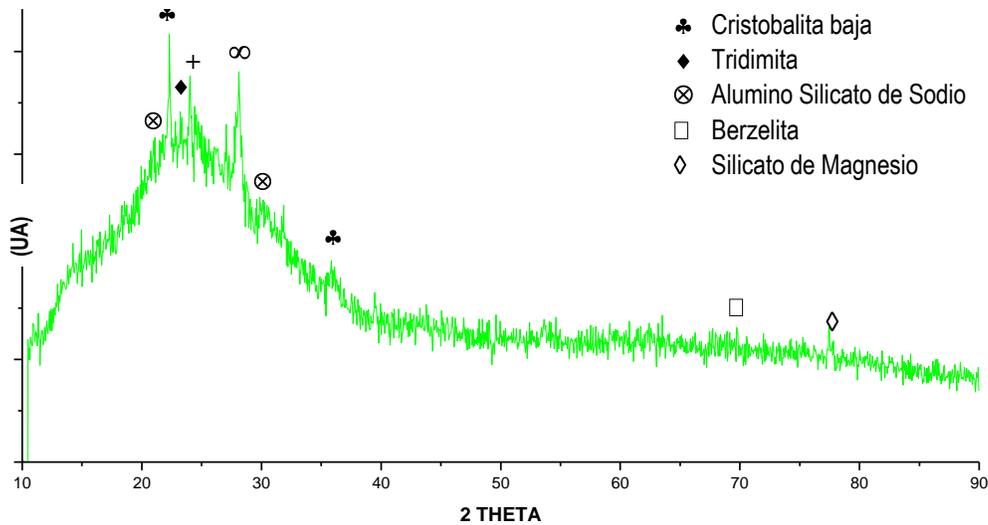
Material	Fases
PTC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Albita</li> <li>• Cristobalita baja</li> <li>• Tridimita</li> <li>• Nefelita</li> <li>• Enstatita</li> <li>• Silicato de calcio</li> <li>• Aluminio silicato de sodio</li> <li>• Calcita</li> <li>• Ferrita de calcio</li> </ul>
PAP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Albita</li> <li>• Silicio-aluminato de potasio</li> <li>• Aluminio silicato de sodio</li> <li>• Silicato de calcio</li> <li>• Almandita</li> </ul>
PVR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Albita</li> <li>• Petalita</li> <li>• Cristobalita baja</li> <li>• Tridimita</li> <li>• Aluminio silicato de sodio</li> <li>• Berzelita</li> <li>• Silicato de magnesio</li> </ul>
PMC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Albita</li> <li>• Cuarzo</li> <li>• Silicato de calcio</li> <li>• Aluminato de magnesio</li> <li>• Aluminio silicato</li> <li>• Oxido de magnesio</li> <li>• Rankinita</li> <li>• Silicato de manganeso</li> <li>• Ferro-titanio</li> <li>• Anerodita</li> <li>• Kianita</li> <li>• Aluminato de manganeso</li> <li>• Manganeso de titanio</li> </ul>



Gráfica 1. Espectros de DRX del material PTC.



Gráfica 2. Espectros de DRX del material PAP.

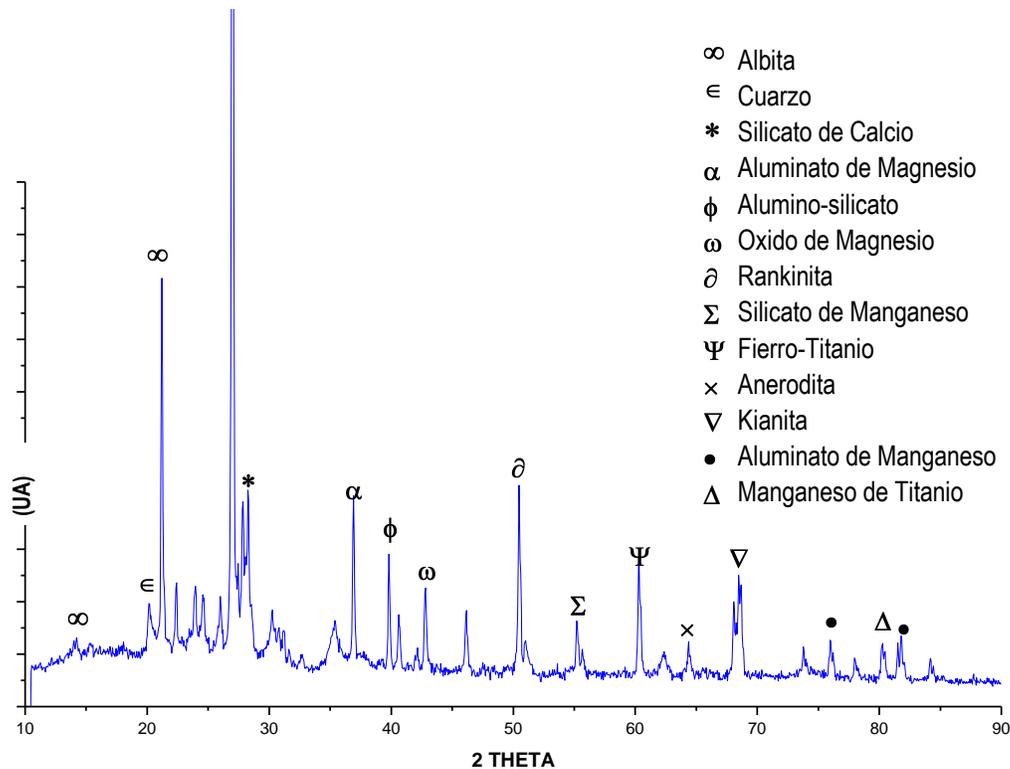


Gráfica 3. Espectros de DRX del material PVR.

En cada uno de los materiales se debe observar que la estructura de la sílice sea amorfa, o sea vidriosa y no cristalina, ya que una estructura cristalina tiene poca reactividad.

En este caso los materiales PVR y PAP (gráficas 2 y 3), tienen claramente una estructura amorfa. La estructura del material PTC (gráfica 1) no es totalmente amorfa, sin embargo tampoco es cristalina y finalmente la estructura del material PMC (gráfica 4) es prácticamente cristalina.

Conociendo esta característica de cada puzolana es posible especular que los materiales PVR y PAP tendrán mayor reactividad puzolánica en una mezcla de mortero o concreto, en comparación con el material PTC, finalmente que el material PMC presentará baja reactividad puzolánica ya que la sílice necesaria en una puzolana se encuentra mayoritariamente en una estructura cristalina.



Gráfica 4. Espectros de DRX del material PMC.

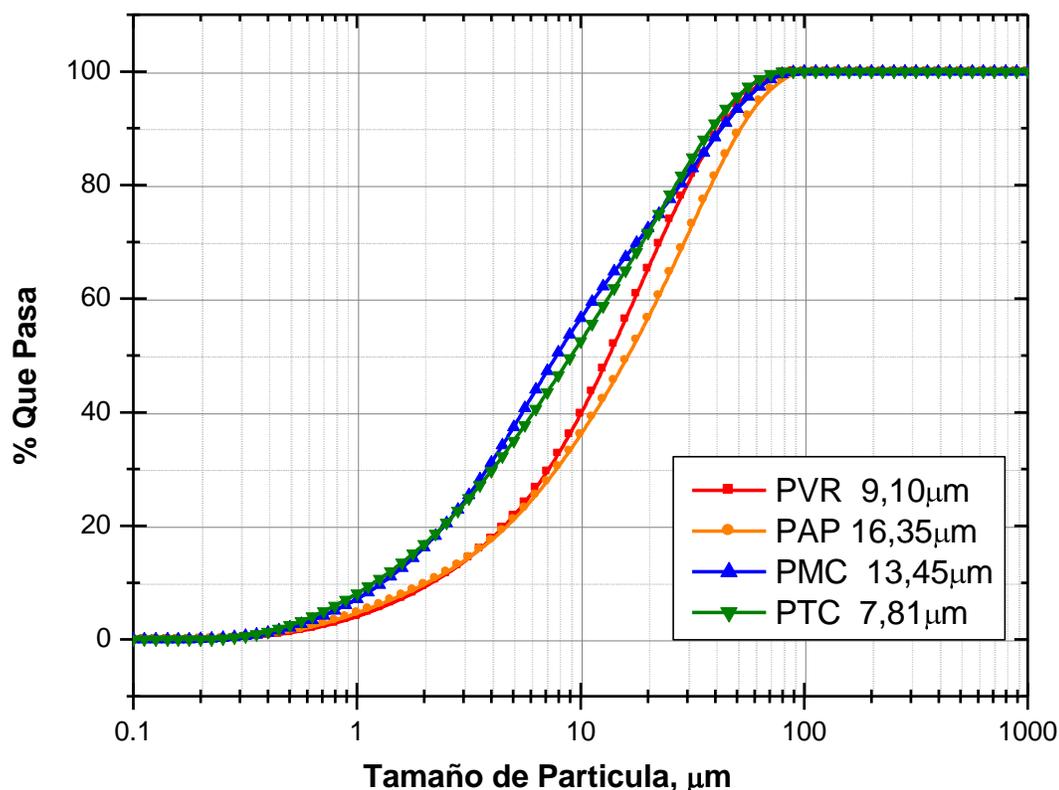
#### 4.1.7 Distribución del tamaño de partículas obtenidas por difracción de rayo láser.

Con la prueba de difracción de rayo láser en polvos se comprobaron los resultados obtenidos con la malla 325 referentes a la fineza de los cuatro materiales, en la tabla 17 y en la gráfica 5 se observa que el material más fino es el PTC y el material más grueso es el PAP, además de esto es posible conocer la distribución del tamaño de partículas general de cada uno de las adiciones minerales.

En este caso, los materiales PTC y PMC son los que tienen un tamaño de partículas con distribución similar, la variación en la distribución del tamaño de partículas con el material PAP y PVR puede ser debido al tiempo de molienda que se le dio a cada uno de los materiales dentro del molino de vibroenergía, ya que no se cuenta con una norma que indique el tiempo específico de molienda para cada material, además de que los materiales a pesar de ser vidrios volcánicos, cada uno cuenta con una resistencia al impacto diferente.

Tabla 17. Tamaño de partículas de los materiales.

Material	d (0.1) $\mu\text{m}$	d (0.5) $\mu\text{m}$	d (0.9) $\mu\text{m}$
PTC	1.19	9.10	38.52
PAP	2.07	16.35	52.04
PVR	2.16	13.45	41.97
PMC	1.30	7.81	42.74



Gráfica 5. Distribución del tamaño de partículas obtenidas por difracción láser.

## 4.2 SISTEMA CEMENTO PORTLAND ORDINARIO-PUZOLANA.

### 4.2.1 Reactividad puzolánica con el cemento Portland ordinario.

Los esfuerzos promedio de resistencia a la compresión obtenidos de los especímenes de morteros ensayados a cada una de las edades establecidas con los diferentes porcentajes de sustitución de CPO y los índices de actividad puzolánica, se presentan en las tablas 18, 19 y 20

hasta la edad de 180 días, la representación gráfica del desarrollo de resistencia a la compresión hasta 56 días se aprecia en las gráficas 6, 7 y 8.

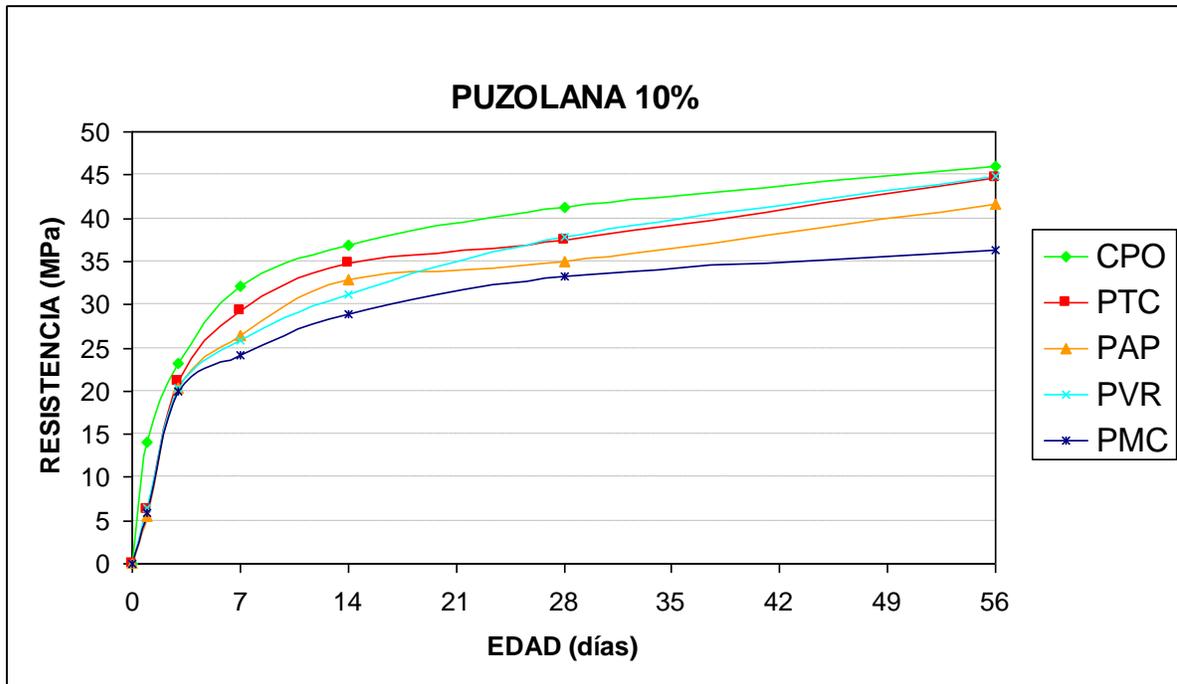
Tabla 18. Índice de actividad puzolánica con 10% de sustitución de CPO.

Edad (días)	Es fuerza promedio MPa *, (IAP)**				
	CPO	PTC	PAP	PVR	PMC
1	14.1 (100)	6.3 (44)	5.5 (39)	6.5 (46)	5.9 (42)
3	23.2 (100)	21.1 (91)	20.3 (87)	20.3 (88)	20 (86)
7	32.2 (100)	29.2 (91)	26.4 (82)	25.8 (80)	24.2 (75)
14	36.9 (100)	34.8 (94)	32.9 (89)	31.1 (84)	29 (78)
28	41.3 (100)	37.4 (90)	34.9 (85)	37.9 (92)	33.4 (81)
56	46 (100)	44.7 (97)	41.7 (91)	44.9 (98)	36.4 (75)
180	53 (100)	48 (91)	53 (100)	50 (94)	44 (83)

\* Promedio de resistencia a la compresión de tres cubos de 5cm<sup>3</sup>.

\*\* **IAP**: Índice de actividad puzolánica e xpresado en %, obtenido como la relación entre la resistencia a la compresión del mortero con puzolana y la resistencia del mortero de referencia.

Los resultados de resistencia a la compresión a la edad de 180 días no fueron graficados (debido a que existe mucha diferencia entre los 56 y los 180 días lo que provoca que no se aprecien los valores en la gráfica con claridad), estos datos se presentan en las tablas de esfuerzo promedio. Como podemos observar a la edad de 180 días la resistencia a la compresión del material PAP es igual a la de la muestra de referencia y los materiales PTC y PVR presentan más del 91% de la resistencia, solo el material PMC presenta el 83% de resistencia respecto a la muestra de referencia. Lo que indica que los materiales con mayor actividad puzolánica son los materiales PTC, PAP y PVR.



Gráfica 6. Desarrollo de resistencia a la compresión con 10% de puzolanas.

Como se observa en la gráfica 6, con un 10% de sustitución del CPO a los 7 días, la pérdida de resistencia a la compresión es del 9% del material PTC siendo este el mínimo y un 25% del material PMC como máximo, esto respecto a la muestra control. Sin embargo, a los 56 días de curado los materiales PTC, PAP y PVR incrementan su resistencia y la diferencia respecto a la muestra control es entre 2 y 9% menor. En cambio con el material PMC la diferencia respecto al control sigue siendo prácticamente la misma.

Los resultados indican que el material PMC posee muy poca reactividad puzolánica, a diferencia de los otros materiales que tiene mayor reactividad puzolánica, sobre todo a edades avanzadas como lo indican los resultados obtenidos a los 180 días.

En la tabla 19, se presentan los resultados de esfuerzo promedio con un porcentaje de sustitución del 20% de CPO por puzolana. Como se aprecia el material PAP es el más reactivo ya que la diferencia respecto a la resistencia de la muestra control es solo del 2% a los 180 días, por lo tanto, este material se puede llegar a utilizar hasta en un 20% como reemplazo del

cemento en una mezcla de mortero o concreto sin afectar adversamente su resistencia a la compresión.

Tabla 19. Índice de actividad puzolánica con 20% de sustitución de CPO.

Edad (días)	Es fuerza promedio MPa *, (IAP)**				
	CPO	PTC	PAP	PVR	PMC
1	14.1 (100)	4.4 (31)	3.5 (25)	7.4 (53)	3.5 (25)
3	23.2 (100)	17.9 (77)	16.7 (72)	17.4 (75)	14.4 (62)
7	32.2 (100)	24.2 (75)	21.6 (67)	22.2 (69)	20.9 (65)
14	36.9 (100)	29.4 (80)	27.5 (74)	26.3 (71)	23.6 (64)
28	41.3 (100)	32.9 (80)	32.2 (78)	30.8 (75)	25.1 (61)
56	46 (100)	33.7 (73)	36.3 (79)	38.7 (84)	26 (57)
180	53 (100)	42 (79)	52 (98)	45 (85)	32 (60)

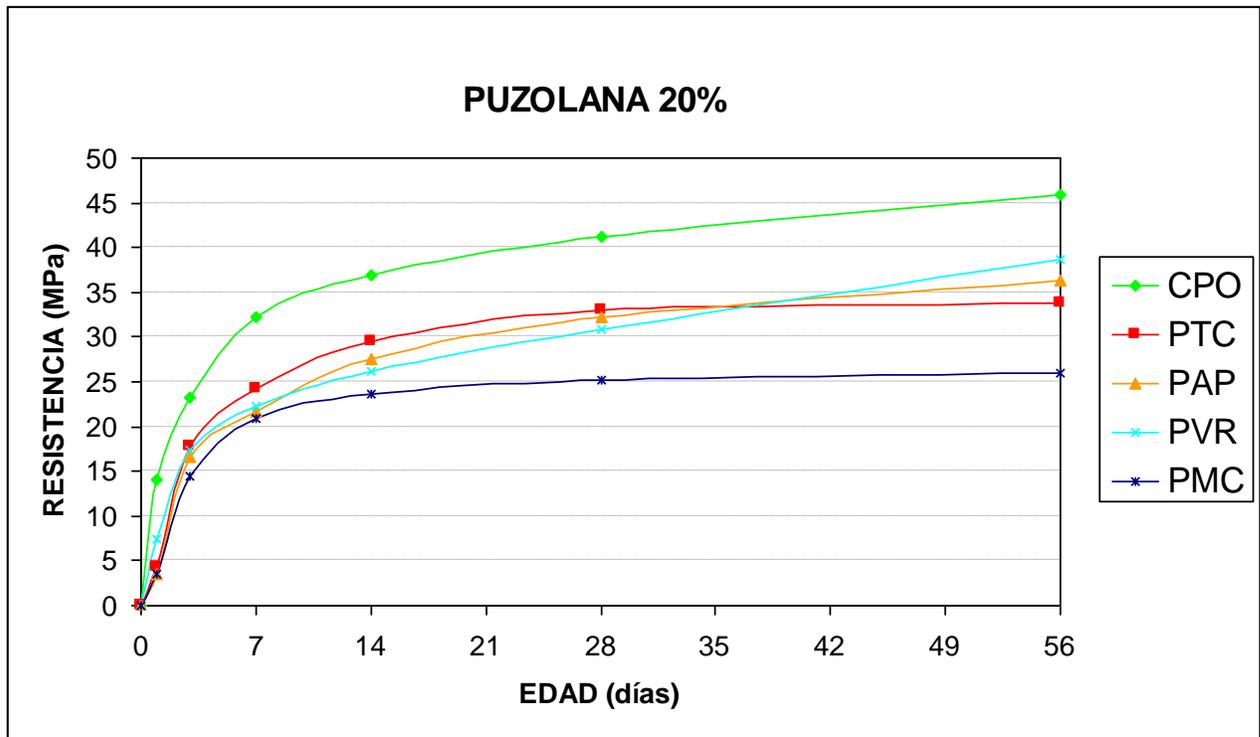
\* Promedio de resistencia a la compresión de tres cubos de 5cm<sup>3</sup>.

\*\* **IAP**: Índice de actividad puzolánica expresado en %, obtenido como la relación entre la resistencia a la compresión del mortero con puzolana y la resistencia del mortero de referencia.

En este caso donde el porcentaje de sustitución fue del 20%, se observa en la gráfica 7 que la diferencia de resistencia a la compresión con respecto a la muestra control es 16% mayor que con el 10% de sustitución.

Para esta prueba la norma ASTM C 618 indica que estos materiales pueden ser considerados como una puzolana natural, si su resistencia a la compresión a los 28 días es como mínimo el 70% de la resistencia obtenida en la muestra de referencia. Con los resultados obtenidos se concluye que los materiales PTC, PAP y PVR pueden ser considerados puzolanas naturales, ya que los morteros que contenían estos tres materiales tienen una resistencia a la compresión mayor al 70% de la resistencia de la muestra control y el material PMC al tener

solo el 61% no puede ser considerado como una puzolana natural ya que no cumple con dicha norma.



Gráfica 7. Desarrollo de resistencia a la compresión con 20% de puzolanas.

En la tabla 20 podemos apreciar que a la edad de 180 días que fue la edad máxima a la que se curaron y ensayaron los especímenes, los materiales PAP y PVR presentan un 93 y 91% respectivamente de la resistencia de la muestra de referencia.

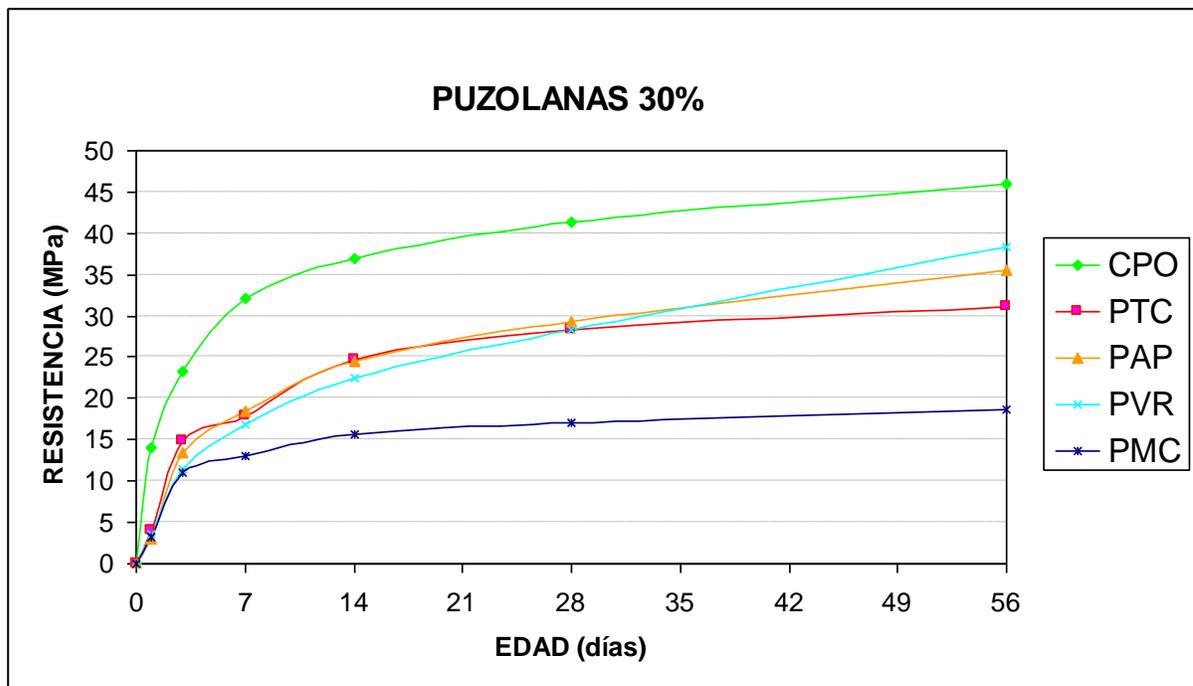
Comparando éstos y los anteriores resultados de resistencia con el análisis químico y de DRX, es posible sugerir que cuando un material cuenta en su composición química con un alto contenido de sílice y sobre todo que si sus fases minerales y estructura es amorfa, el material desarrollará resistencia a la compresión gracias a su reactividad puzolánica  $\text{Ca(OH)}_2$ , como los materiales PAP y PVR.

Tabla 20. Índice de actividad puzolánica con 30% de sustitución de CPO.

Edad (días)	Es fuerza promedio MPa *, (IAP)**				
	CPO	PTC	PAP	PVR	PMC
1	14.1	4	3	3.7	3.3
	(100)	(28)	(21)	(26)	(23)
3	23.2	14.8	13.4	11.4	11
	(100)	(64)	(58)	(49)	(47)
7	32.2	17.8	18.4	17	13.1
	(100)	(55)	(57)	(53)	(41)
14	36.9	24.8	24.4	22.6	15.7
	(100)	(67)	(66)	(61)	(43)
28	41.3	30.2	29.3	28.4	17.1
	(100)	(73)	(71)	(69)	(41)
56	46	31.1	35.6	38.3	18.7
	(100)	(68)	(77)	(83)	(41)
180	53	37	49	48	25
	(100)	(70)	(93)	(91)	(47)

\* Promedio de resistencia a la compresión de tres cubos de 5cm<sup>3</sup>.

\*\* **IAP**: Índice de actividad puzolánica expresado en %, obtenido como la relación entre la resistencia a la compresión del mortero con puzolana y la resistencia del mortero de referencia.



Gráfica 8. Desarrollo de resistencia a la compresión con 30% de puzolanas.

En la gráfica 8 se observan los resultados con una sustitución del 30% hasta los 56 días, en donde el material PVR es el que tiene mayor reactividad puzolánica, después el material PAP, a continuación el material PTC y finalmente el material PMC.

Como se mencionó anteriormente, la reactividad de cada material se debe en gran parte a la estructura interna de cada material, de acuerdo al análisis de DRX los materiales más amorfos y por lo tanto más reactivos son el PVR y el PAP y el más cristalino y menos reactivo es el material PMC. Lo que indica que a pesar de que un material cuente con un alto contenido de  $\text{SiO}_2$  en su composición química, si su estructura interna es cristalina este material no tendrá reactividad puzolánica, a menos de que se le aplique algún tratamiento especial para modificar su estructura interna, por ejemplo someter el material a un tratamiento térmico y después enfriarlo rápidamente para lograr que su estructura sea vuelva amorfa.

Por lo tanto después de analizar los resultados de la caracterización de los materiales y compararlos con los índices de actividad puzolánica obtenidos, se sugiere realizar una revisión a la norma ASTM C 618 que indica que si en la composición química de un material el porcentaje de los óxidos mayores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) es superior a 70% entonces éste material es una puzolana natural. Sin embargo, de acuerdo a los resultados de esta investigación, los cuatro materiales cumplen con el porcentaje de óxidos mayores, pero el material PMC a pesar de tener alto contenido de  $\text{SiO}_2$ , posee muy poca reactividad puzolánica con el CPO.

Por lo tanto solo los materiales PTC, PAP y PVR pueden ser considerados puzolanas ya que estos si tienen buena reactividad puzolánica con el CPO.

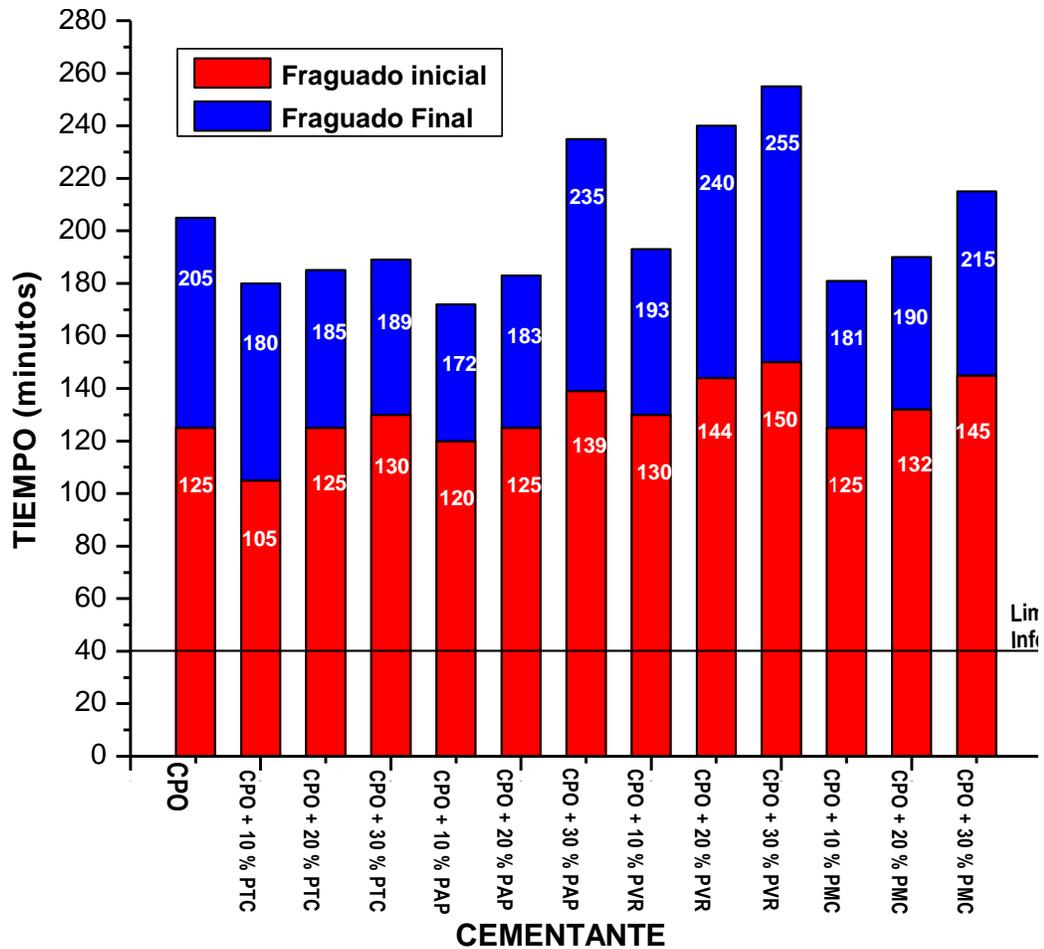
#### **4.2.2 Consistencia normal y tiempos de fraguado.**

En la tabla 21 y en la gráfica 9 se muestran los tiempos de fraguado inicial y final Vicat, obtenidos en pastas de CPO-puzolana. Como se conoce, las puzolanas son materiales que reaccionan con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  liberado durante la hidratación del cemento, por lo tanto estos resultados son poco confiables para conocer la reactividad puzolánica que posee cada material, ya que en la hidratación de un cemento Portland ordinario la formación del C-S-H comienza aproximadamente a las 12 horas después de su elaboración (Leas, 2005), y es entonces cuando

comienza a liberarse el  $\text{Ca(OH)}_2$  que va a reaccionar con las puzolanas para formar compuestos con propiedades cementantes. Por lo tanto estos resultados sirven para conocer como es afectado el fraguado de una pasta de cemento y la cantidad de agua requerida cuando un material con propiedades puzolánicas es utilizado.

Tabla 21. Tiempos de fraguado por Vicat.

Material	Fraguado (minutos)	
	Inicial	Final
CPO	125	205
PTC 10%	105	180
PTC 20%	125	185
PTC 30%	130	189
PAP 10%	120	172
PAP 20%	125	183
PAP 30%	139	235
PVR 10%	130	193
PVR 20%	144	240
PVR 30%	150	255
PMC 10%	125	181
PMC 20%	132	190
PMC 30%	145	215



Gráfica 9. Tiempos de Fraguado Inicial y Final (Vicát).

Con los resultados de esta prueba es posible tener una idea de la velocidad con se hidratan en la pasta de CPO cada adición mineral. Como es posible apreciar en la gráfica el material PTC se hidrata con más velocidad que los otros materiales y el material PVR se hidrata más lento. Sin embargo, el fraguado inicial de las pastas CPO-puzolana presenta tiempos similares, que se encuentra en un rango de 105 a 150 minutos. Éste fraguado inicial se incrementa conforme se aumenta el porcentaje de puzolana en la sustitución del CPO.

Los tiempos de fraguado inicial de las pastas CPO-puzolana son similares a los tiempos de la muestra de referencia, solo dos tiempos de fraguado inicial son menores que el tiempo de la muestra de referencia. Donde se presentó mayor diferencia fue con los porcentajes altos de los materiales PAP, PVR y PMC.

Para el fraguado final, la mayoría de los tiempos de fraguado fue menor que el fraguado de la muestra de referencia, solo cuatro resultados fueron más altos, y fue donde la diferencia del fraguado inicial con la muestra de referencia fue mayor o igual a 14 minutos.

Este resultado en los tiempos de fraguado también es resultado de la cantidad de agua utilizada con cada adición mineral para obtener la consistencia normal de  $10\pm 1$  en las pastas elaboradas.

El material PTC y el material PAP fueron los que demandaron menor cantidad de agua, incluso que la muestra de referencia, por ello obtuvieron los tiempos de fraguado inicial y final más bajos. Los materiales PVR y PMC fueron los materiales que demandaron mayor cantidad de agua que la muestra de referencia, lo que incrementó los tiempos de fraguado inicial y final vicat.

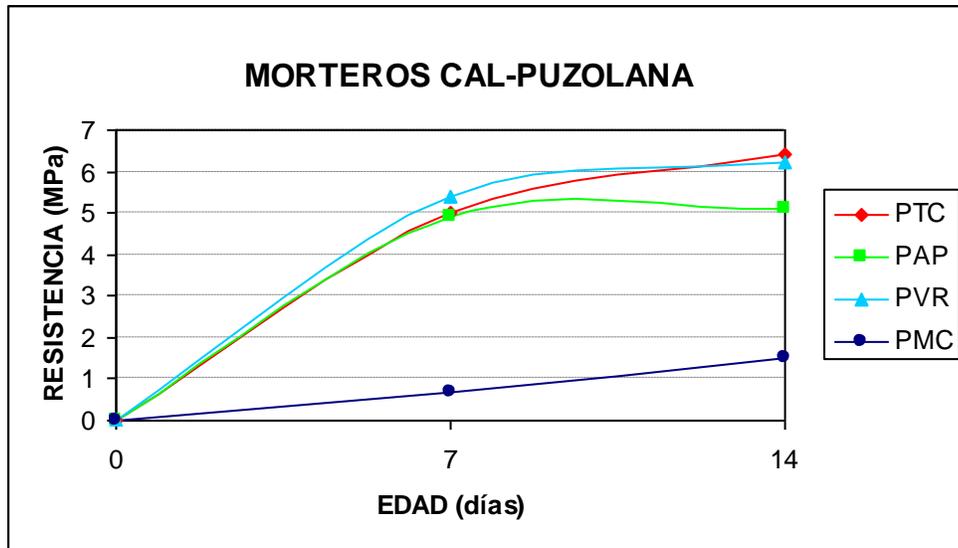
Algo importante es que entre más alta sea el área superficial de una puzolana, mayor será la cantidad de agua que demandará, y de acuerdo a los resultados el material PVR tiene un área de  $60 \text{ m}^2/\text{g}$ , mucho mayor que el área de los otros materiales analizados. Por ello este material fue el que demandó más agua y respectivamente el que incrementó más los tiempos de fraguado.

## **4.3 SISTEMA CAL-PUZOLANA.**

### **4.3.1 Resistencia a la compresión en morteros cal-puzolana.**

En la gráfica 10 se presenta el desarrollo de la resistencia a la compresión de cubos de mortero cal-puzolana.

De acuerdo a los resultados la resistencia a la compresión obtenida de cubos de mortero ensayados a 7 y 14 días, los materiales PTC, PAP y PVR presentan reactividad con el  $\text{Ca(OH)}_2$  y el material PMC presenta poca o nula reactividad con el  $\text{Ca(OH)}_2$ . Esto debido a lo mencionado anteriormente, sobre todo el análisis de DRX del material PMC, el cual se encontró que cuenta con una estructura interna prácticamente cristalina, lo que hace que este material tenga baja reactividad puzolánica con el hidróxido de calcio.



Gráfica 10. Desarrollo de resistencia a la compresión de morteros cal-puzolana.

Al comparar el desarrollo de resistencia a la compresión de las adiciones minerales con el hidróxido de calcio que se aprecia en la gráfica 10 con los resultados de resistencia a la compresión con el CPO (graficas 6, 7 y 8), se aprecia un comportamiento muy similares en ambos sistemas, donde los materiales PTC, PAP y PVR presentan reactividad puzolánica y el material PMC presenta muy poca reactividad, es decir su reactividad es casi nula.

#### 4.3.2 Método alternativo A (Franke modificado) para pastas cal-puzolana.

En la tabla 22 se muestra la cantidad de cal libre y la cantidad de cal que reaccionó en las pastas cal-puzolana hasta la edad de 21 días según el método de prueba alternativo A.

Esta prueba es adecuada para conocer las propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico ya que es rápida y confiable, no es necesario esperar a que las pastas cumplan edades tardías.

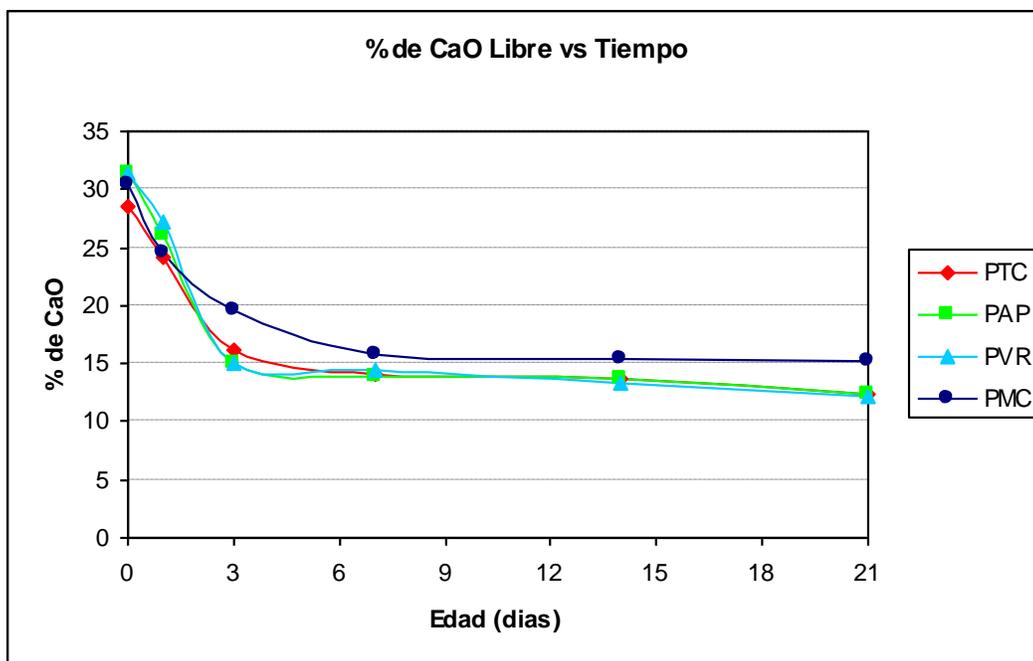
Con los resultados obtenidos en esta prueba, se corroboran los resultados obtenidos en las pruebas anteriores, donde se encontró que los materiales PTC, PAP y PVR, tienen reactividad puzolánica y que el material PMC posee baja actividad puzolánica, ya que este material fue el que menos cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  consumió.

Tabla 22. Resultados de contenido de cal libre en pastas cal-puzolana según el método Franke.

<b>Material</b>	<b>Edad (días)</b>	<b>Ácido Perclórico (mL)</b>	<b>Cal libre (% en masa)</b>	<b>Cal Combinada (% en masa)</b>
PTC	0	-	28.54	0
	1	11.65	24.22	4.32
	3	7.74	16.09	12.45
	7	6.82	14.17	14.37
	14	6.63	13.78	14.76
	21	5.90	12.27	16.27
PAP	0	-	31.42	0
	1	12.53	26.04	5.38
	3	7.23	15.02	16.40
	7	6.73	13.98	17.44
	14	6.59	13.70	17.72
	21	5.98	12.43	18.99
PVR	0	-	31.33	0
	1	13.13	27.29	4.04
	3	7.20	14.97	16.36
	7	6.98	14.50	16.83
	14	6.37	13.23	18.10
	21	5.83	12.11	19.22
PMC	0	-	30.50	0
	1	11.79	24.51	5.99
	3	9.44	19.63	10.87
	7	7.59	15.78	14.72
	14	7.43	15.44	15.06
	21	7.29	15.16	15.34

En la gráfica 11 se aprecia que la cantidad de cal combinada con los materiales PTC, PAP y PVR es similar, es decir de los 0 a los 3 días la cantidad de cal que se combina con las puzolanas es aproximadamente la mitad de la cal existente en las pastas, sin embargo de los 3 a los 21 días este consumo de cal disminuye y la formación de C-S-H es menor.

En esta gráfica se aprecia nuevamente que el material PMC es el que presenta poca actividad puzolánica.



Gráfica 11. Porcentaje de cal libre en pastas cal-puzolana (método Franke).

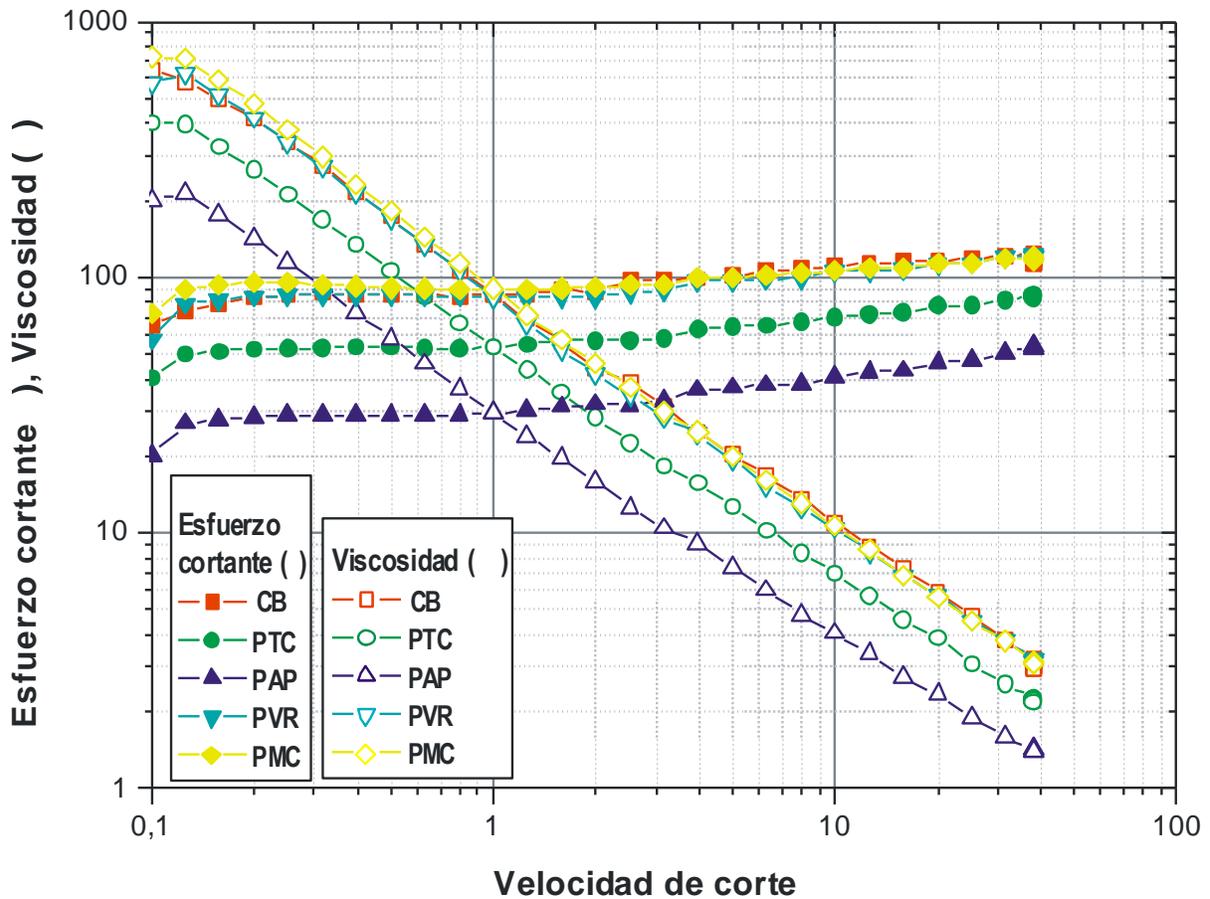
## 4.4 REOLOGÍA DE PASTAS CEMENTO BLANCO-PUZOLANA.

### 4.4.1 Comparación de resultados en pastas Cemento Blanco-puzolana.

En la gráfica 12, se muestran los resultados obtenidos en pastas con un 10% de sustitución del cemento blanco con cada uno de los materiales.

Con la sustitución de los materiales PVR y PMC, no se modifica ni la viscosidad ni es esfuerzo de corte de la pasta, en cambio con los materiales PTC y PAP disminuyen la viscosidad de las pastas elaboradas, esto sucede conforme se aumenta la velocidad de corte en el reómetro.

Con estos resultados es posible conocer cómo afectan los materiales puzolánicos el mezclado de la pasta de cemento que es parte de lo que se conoce como la trabajabilidad, con base en ello es posible hacer una estimación la cantidad de aditivos que es necesaria utilizar en una mezcla de mortero.

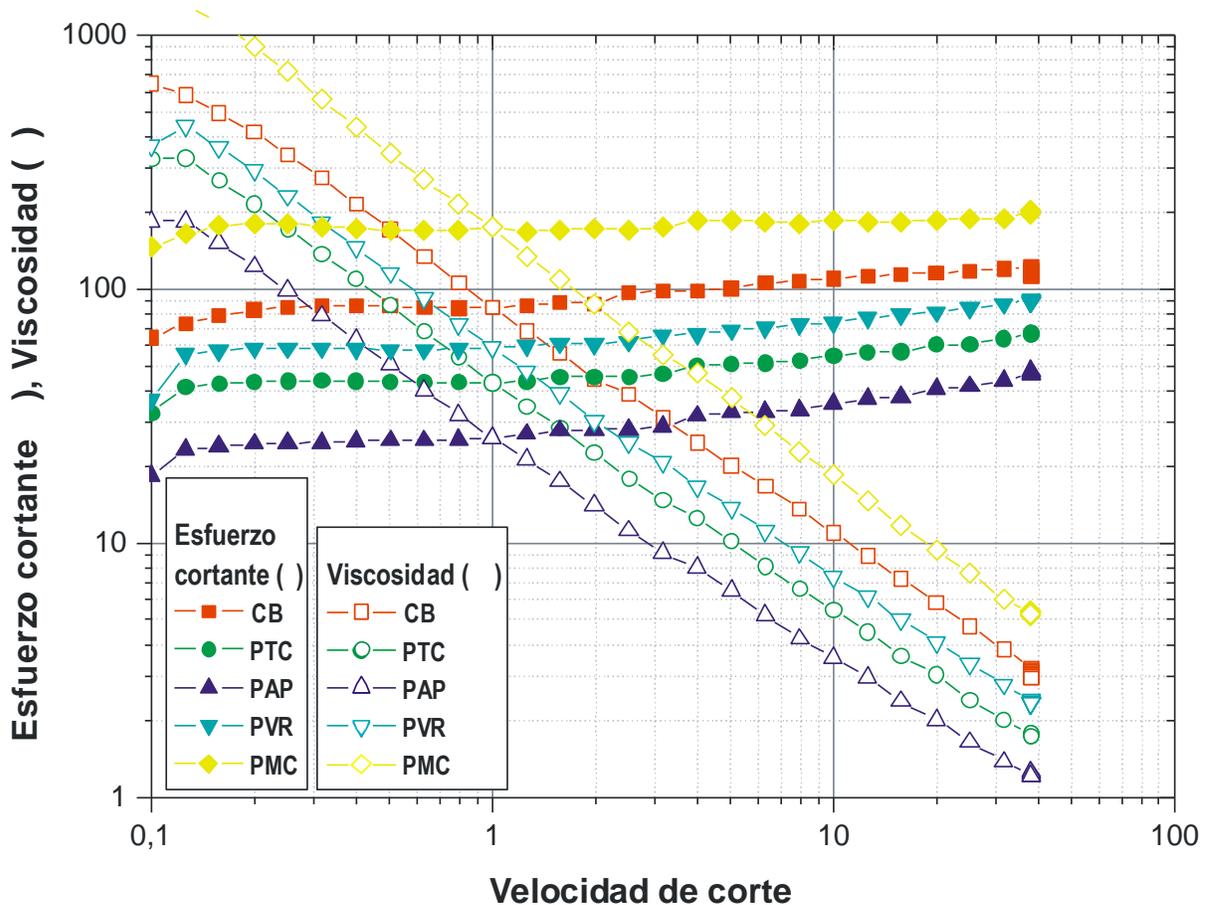


Gráfica 12. Reología en pastas de CB con 10% de puzolana.

En la gráfica 13, se muestran los resultados obtenidos en pastas con un 20 % de sustitución del cemento con cada uno de los materiales. En este caso, los materiales PTC, PAP y PVR, disminuyeron la viscosidad de las pastas y el material PMC, la incremento, esto en relación con la pasta de referencia de CB sin puzolana.

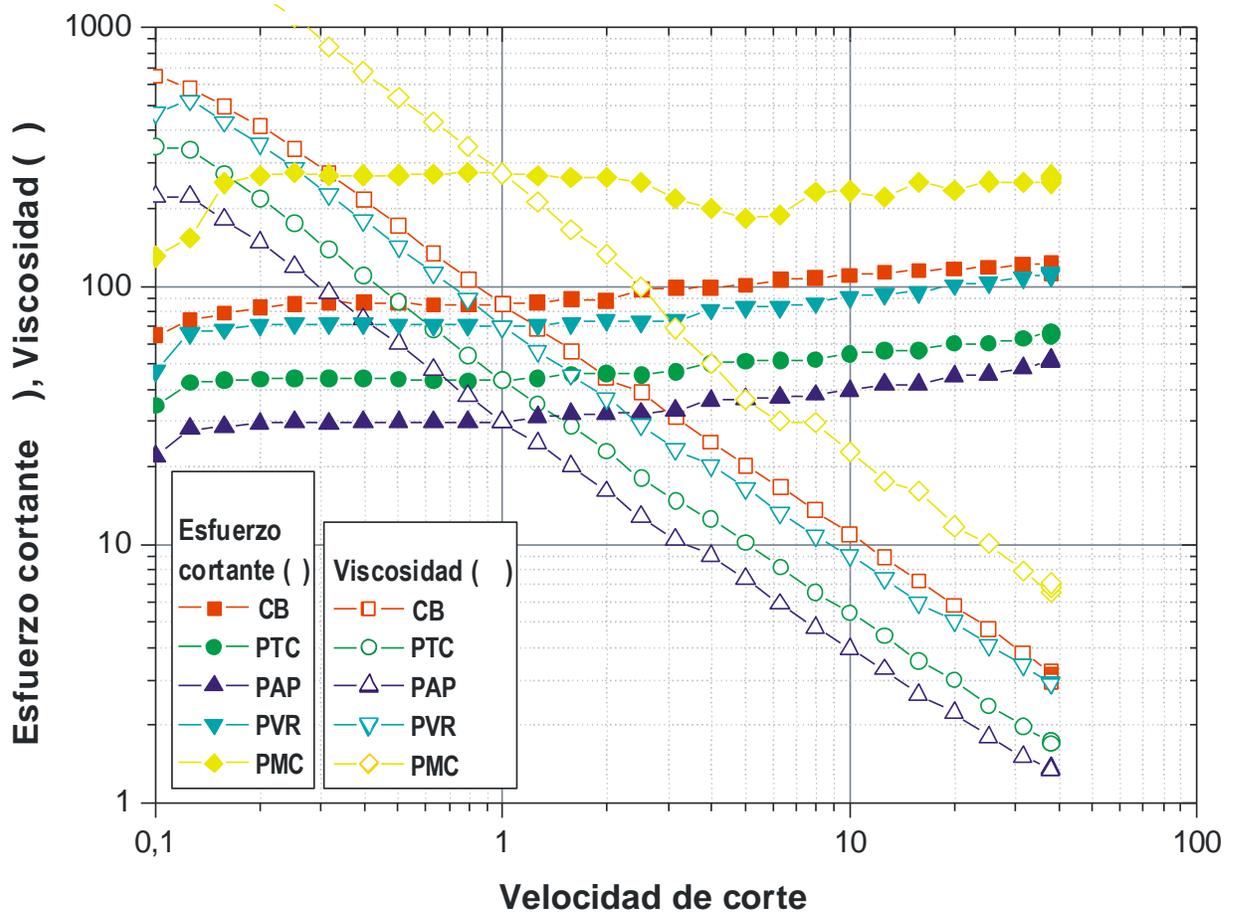
Este resultado en el incremento de la viscosidad de la pasta es posible relacionarlo con el alto contenido de  $Al_2O_3$  en la composición química del material PMC, lo cual hace que las partículas de cemento queden encapsuladas, incrementando así la resistencia de la pasta en estado fresco es decir su elasticidad, por lo que la viscosidad y el esfuerzo de corte se incrementa en comparación con la viscosidad de la muestra de referencia.

La reducción en la viscosidad indica una posible mejora en la trabajabilidad de las pastas, aunque bajo ciertas condiciones podría ocasionar segregación de los agregados, sobre todo en el caso de las mezclas conteniendo PAP.



Gráfica 13. Reología en pastas de CB con 20% de puzolana.

En la gráfica 14, se muestran los resultados obtenidos en pastas con un 30 % de sustitución del cemento con cada uno de los materiales puzolánicos evaluados, y a pesar de que se incrementó el porcentaje de sustitución de puzolana, la viscosidad de las pastas con los materiales PTC, PAP y PVR no disminuyó como sucedió con la sustitución del 20% del cemento, sino que se mantuvo, en cambio la viscosidad y el esfuerzo de corte de la pasta elaborada con el material PMC, se incrementó al aumentar el porcentaje de sustitución del cemento, además de ello en la gráfica 14 se aprecia que la serie de datos ya no tiene forma lineal como sucedió en las gráfica 12 y 13, sino que presenta algo de ruido.



Gráfica 14. Reología en pastas de CB con 30% de puzolana.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones elaboradas de acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo de tesis.

### 5.1 CONCLUSIONES.

- 1) De acuerdo a los resultados de caracterización los materiales *PAP* y *PVR* son considerados puzolanas naturales, ya que son materiales con una estructura amorfa, presentan las mayores áreas superficiales y el porcentaje de óxidos mayores en su composición química es de 81%.
- 2) El material *PTC* también es considerado puzolana a pesar de no tener las mismas características de los materiales *PAP* y *PVR*, sin embargo por los resultados de resistencia a la compresión obtenidos en los morteros CPO-puzolana y Cal-puzolana, es posible concluir que este material posee actividad puzolánica.
- 3) El material *PMC*, a pesar de tener un alto contenido de sílice, no cumple con las características de una puzolana, ya que tiene una estructura cristalina y no presenta actividad puzolánica en los morteros elaborados.
- 4) Los resultados de resistencia mecánica a la compresión a los 28 días, muestran que los materiales *PTC*, *PAP* y *PVR* presentan actividad puzolánica con respecto a la muestra control (CPO), cumpliendo así con lo establecido en la norma ASTM C 618 para ser considerados materiales puzolánicos.
- 5) De acuerdo a los resultados de resistencia a la compresión en las pruebas CPO-puzolana obtenidos a la edad de 180 días, el material con más reactividad puzolánica es el material *PAP*, en los tres porcentajes de sustitución del cemento, es decir que este material es el que consume más cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  en la pasta de los morteros elaborados.
- 6) A pesar de que el la resistencia a la compresión de los morteros disminuye en comparación con la muestra de referencia, el porcentaje óptimo de reemplazo de cemento es de 10%, ya que con este porcentaje se disminuye menos la resistencia de los morteros con respecto a la muestra de referencia.
- 7) Los materiales *PTC*, *PAP* y *PVR*, presentan actividad puzolánica con el  $\text{Ca(OH)}_2$  en los morteros cal-puzolana a 7 días, cumpliendo así con las normas ASTM, sin embargo, la

velocidad de hidratación de estos materiales en las pastas con puzolana es lenta a partir del tercer día, siendo materiales que reaccionan a edades avanzadas.

- 8) El material PVR es el que tiene menor influencia en la viscosidad de las pastas, aún con una sustitución de cemento del 30%, en comparación con el efecto que tienen los otros materiales, es decir este material afecta muy poco el mezclado de la pasta.
- 9) Los materiales PTC y PAP son los que más disminuyen la viscosidad de las pastas elaboradas, es decir estos materiales mejoran el mezclado de la pasta, al mejorar esta propiedad se reduce la posibilidad del uso de aditivos químicos.
- 10) La pasta de cemento incrementa su viscosidad al sustituir un 20 y un 30% del cemento por el material PMC, lo que se refleja en un incremento en la demanda de agua para lograr la misma viscosidad o trabajabilidad de las pastas con los otros materiales.

## 5.2 RECOMENDACIONES.

Las siguientes recomendaciones se presentan de acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo de tesis con el objetivo de incrementar y reforzar la información que servirá para evaluar bancos de materiales de origen volcánico o materiales que presenten características similares a las de las puzolanas naturales y así poder utilizarlos en la industria de la construcción tanto en México como en el resto del mundo.

- 1) Realizar un análisis petrográfico donde es posible apreciar la estructura de cada uno de los materiales, esto puede complementar la información obtenida en el análisis de DRX y con ello poder comparar los resultados con la información existente en la literatura de otros materiales con características similares.
- 2) Realizar pruebas de resistencia a la compresión en cilindros de concreto sustituyendo un 10 y 20% del material cementante para conocer el efecto de estos materiales en el concreto y compararlos con los resultados obtenidos en las pruebas en cubos de mortero.
- 3) Realizar un análisis morfológico en el Microscopio Electrónico de Barrido a muestras de morteros y concretos a diferentes edades de curado para conocer cómo se comportan las puzolanas dentro de la pasta de cemento, principalmente como es el consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  y la formación de C-S-H.
- 4) Realizar más y diferentes pruebas para investigar a fondo los efectos de las puzolanas naturales en la reología de pastas de cemento, utilizando diferentes porcentajes de sustitución de los materiales y relaciones agua-material cementante así como diferentes tipos de aditivos.
- 5) Elaborar morteros de CPO utilizando una puzolana artificial como la ceniza volante y sustituyendo los mismos porcentajes utilizados en esta investigación con el fin de realizar una comparación de los resultados obtenidos con los materiales naturales con los resultados de ceniza volante.
- 6) Realizar las mismas pruebas utilizando cemento Portland puzolánico, que es el mas comercializado en Oaxaca, para conocer los beneficios obtenidos con este tipo de cemento.

- Armendariz L. E., (2006). *Reactividad de puzolanas artificiales con el hidróxido de calcio y su correlación con sus características físico-químicas*. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, pp. 3, 14.
- Ahmad Sh. y Aimin X., (2006). *Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs*. Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp. 457-468.
- Azmar Internacional, Inc (2002) *Pure natural pozzolan cement*. pp. 1-11.
- Basri H. B., Mannan M. A. y Zain M. F. M., (1998). *Concrete using waste oil palm shells as aggregate*. Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 614-622.
- C. Adnan, (2003). *Characteristic of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan*. Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 585-593.
- Caijun Sh., (2001). *An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 28, pp. 778-786.
- Castro B. P., (2005). *VIII Congreso Latinoamericano de patología de la Construcción. X Congreso de control de la calidad en la construcción*. Conpat Asunción Paraguay.
- Castro B. P., *Corrosión en estructuras de concreto armado, teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones*. Editado por el IMCYC, primera edición, pp. 12.
- Cyr M., Coutand M. y Clastres P., (2007). *Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials*. Cement and Concrete Research, 37, pp. 1278-1289.
- Damtoft J. S., Lukasik J., Herfort D., Sorrentino D. y Gartner E. M., (2008). *Sustainable development and climate change initiatives*. Cement and Concrete Research, 38, pp. 115-127.
- Escalante G. J. I., (2002). *Materiales alternativos al cemento Portland*. Avance y perspectiva, Vol. 21, pp. 79-88.
- Ferraris. CH. (1999). *Measurement of the rheological properties of cement paste: a new approach*, Symposium internacional RILEM, Monterrey, México, RILEM publicaciones, pp. 333-342.
- Garboczi, E. J., (1990). *Permeability, diffusivity, and microstructural parameters: a critical review*. Cement and Concrete Research, Vol.20, No.4. pp. 591-601.
- García, R. J. L., (2006). *Manual Técnico de Construcción*. Holcim Apasco. pp. 75-81.

- Grudemo A. (1975). *Development of strength properties of hydrating cement pastes and their relation to structural features*, Proc. Symp. on Some Recent Research on Cement Hydration, Cembereu.
- Hanehara Sh. y Yamada K., (2008). *Rheology and early age properties of cement systems*. Cement and Concrete Research, 21, pp. 175-195.
- Hewlett P. C., (2005). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Cuarta Edición.
- Katyal N. K., Sharman J. M., Dhawan A. K., Ali M. M. y Mohan K., (2008). *Development of rapid method for the estimation of reactive silica in fly ash*. Cement and Concrete Research, 38, pp. 104-106.
- Khandaker M. y Anwar H., (2003). *Blended cement using volcanic ash and pumice*. Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 1601-1605.
- Khandaker M. y Anwar. H., (2004). *Development of volcanic pumice based cement and lightweight concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 56, pp. 99-109.
- Khandaker M. y Anwar. H., (2004). *Potential use of volcanic pumice as a construction material*. Journal of materials in civil engineering, pp. 573-577.
- Khandaker M., Anwar H. y Lachemi M. (2007). *Strength, durability and micro-structural aspects of high performance volcanic ash concrete*. Cement and Concrete Research, 37, pp. 759-766.
- Kosmatka H., (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, EU, Portland Cement Association.
- Love C. A., Richardson I. G., Brough A. R., (2007). *Composition and structure of C-S-H in white Portland cement-20% metakaolin pastes hydrated at 25°C*. Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp. 109-117.
- Malhotra. M. V., Ramezani pour A. A., (1997). *Fly ash in concrete*. Second edition. Editado por CANMET (1994). Ottawa Canada. Pag. 23 y 24.
- Mehta K. y Monteiro P., (1998). *Concreto, Estructura, propiedades y materiales*, Primera Edición, IMCYC.
- Nehdí M., Duquette J. y El Damatty A., (2003). *Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 1203-1212.
- Neville M. A. (1996). *Properties of Concrete*, Fourth Edition, Wiley.

- Neville M. A. (1999). *Tecnología del Concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Primera Edición.
- Obras Web. (2003). *Principales países productores de cemento*. México. De <http://www.obrasweb.com>
- Pacheco J., Fajardo S. M. G. y Valdez T. P., (2007). *El rol de las puzolanas naturales en el mejoramiento de la durabilidad del concreto reforzado*. Ciencia FIC, Vol. I, No. 1, pp. 5-18.
- Payá J., Monzó J., Borrachero M. V., Serna P., Velázquez S. y Ordóñez L. M., (2002). *El Factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silicoaluminosas muy reactivas*. VII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandia. pp. 591-600.
- Quiñón de la C. F. J., (2001). *Estado actual de la investigación de las puzolanas en Guatemala como material de construcción*. Primeras Jornadas Iberoamericanas sobre “Caracterización y normalización de materiales de construcción”. Programa CYTED Madrid.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2004). *Materiales para Concreto Hidráulico, Finura del Cemento por el Método de Permeabilidad al Aire*. Métodos de muestreo y prueba de materiales, pp. 1-4.
- Stutzman, P., (2004). *Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure*. Cement and Concrete Composites, Vol. 26, No. 8, pp. 957-966.
- Tangchirapat W., Saeting T., Jaturapitakkul Ch., Kiattikomol K. y Siripanichgorn A. (2006). *Use of waste ash from palm oil industry in concrete*. Waste Management.
- Targan S., Olgun A., Erdogan Y., Sevinc V., (2003). *Influence of natural pozzolan, colemanite ore waste, bottom ash, and fly ash on the properties of Portland cement*. Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 1175-1182.
- Valdez T. P. L., (2002) *Desarrollo de un método para evaluar materiales naturales con potencial puzolánico para su uso en cemento*. Tesis de doctoral con especialidad en Ciencias de Materiales, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Valdez T. P. L., Tushar K. D. R., Rivera V. R., (2004). *Evaluación de la velocidad de hidratación en sistemas puzolanas naturales portlandita*. Ciencia UANL, Vol. VII, No. 2, 33, pp. 190-195.
- Vikan H., Justnes H., Winnefeld G. y Figi R., (2007). *Correlating cement characteristics with rheology of paste*. Cement and Concrete Research, 37, pp. 1502-1511.

- Vikan H. y Justnes H., (2007). *Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone*. Cement and Concrete Research, 37, pp. 1512-1517.
- Wang A., Zhang Ch., Sun W., (2003). *Fly ash effects. The active effects of fly ash*. Cement and Concrete Research, 34, pp. 2057-2060.
- ASTM C 94-04, *Standard Specification for Ready-Mixed Concrete*. Section 4, Volume 4.01, 2005, pp. 1-11.
- ASTM C 109-02, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. Section 4, Volume 4.01, 2005, pp. 76-81.
- ASTM C 188-95 (2003), *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*. Section 4, Volume 4.01, 2005, pp. 178-178.
- ASTM C 114-01, *Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement; Free Calcium Oxide*. Section 4, Volume 4.01, 2002, pp. 109-138.
- ASTM C 187-98, *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*. Section 4, Volume 4.01, 2002, pp. 175-176.
- ASTM C 191-01, *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. Section 4, Volume 4.01, 2002, pp. 179-184.
- ASTM C 305-99, *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. Section 4, Volume 4.01, 2005, pp. 219-221.
- ASTM C 311-93, *Standard Test Method for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete*. Section 4, Volume 4.01, 2005, pp. 192-197.
- ASTM C 430 – 96 (2003), *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- $\mu$ m (No. 325) Sieve*, Section 4, Volume 4.01, 2005, pp. 242-244.
- ASTM C 618-05. *Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*.
- ASTM C 1602, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. Section 4, Volume 4.01, 2005, pp. 76-81.