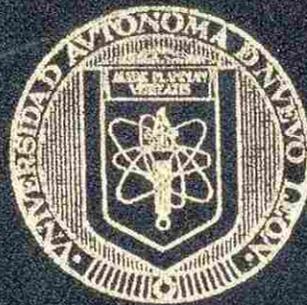


**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**DESARROLLO DE UN METODO PARA EVALUAR MATERIALES NATURALES  
CON POTENCIAL PUZOLANICO PARA SU USO EN CEMENTO**

**POR**

**PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ**

**TESIS**

**Como requisito parcial para obtener el grado de  
Doctor en Ingeniería con Especialidad en Materiales**

**CIUDAD UNIVERSITARIA DICIEMBRE DEL 2002.**

20002

25853

M2

FIME

2002

734

DESARROLLO DE UN METODO PARA EVALUAR MATERIALES NATURALES

CON POTENCIAL PUZZOLANICO PARA SU USO EN CEMENTO

P.L.V.T.



1020149023



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESARROLLO DE UN METODO PARA EVALUAR MATERIALES NATURALES  
CON POTENCIAL PUZOLANICO PARA SU USO EN CEMENTO

POR

PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TESIS

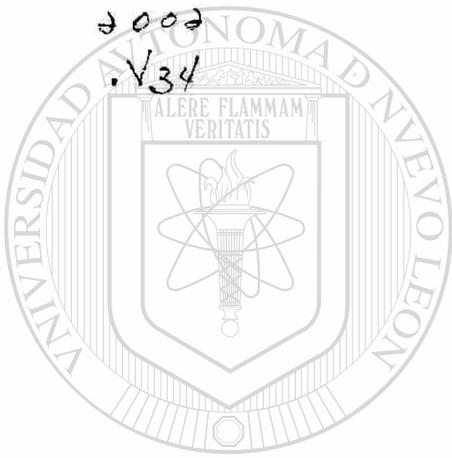
Como requisito parcial para obtener el grado de  
Doctor en Ingeniería con Especialidad en Materiales

CIUDAD UNIVERSITARIA DICIEMBRE DEL 2002

981885

TD  
Z 5853  
.M2  
TIME

2002  
.V34



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA EVALUAR  
MATERIALES NATURALES CON POTENCIAL  
PUZOLÁNICO PARA SU USO EN CEMENTO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**POR**  
**DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS**  
**PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ**

**Como requisito parcial para obtener el grado de  
Doctor en Ingeniería con Especialidad en Materiales**

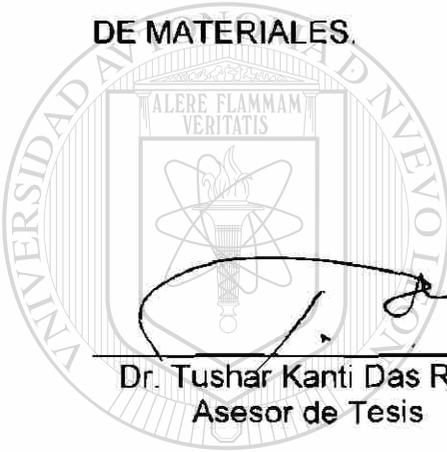
**Diciembre de 2002**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis  
**“DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA EVALUAR MATERIALES  
NATURALES CON POTENCIAL PUZOLÁNICO PARA SU USO EN EL  
CEMENTO”** realizada por el MC PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ, sea  
aceptada para su defensa como opción al grado de DOCTOR EN INGENIERÍA  
DE MATERIALES.

El Comité de Tesis

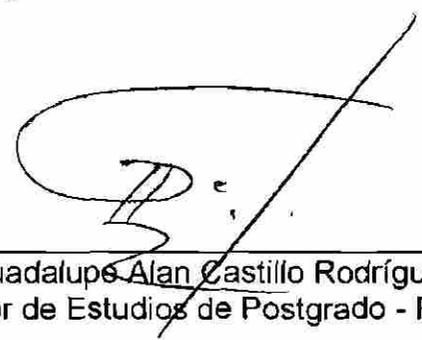


  
Dr. Tushar Kanti Das Roy  
Asesor de Tesis

  
Dr. Raymundo Rivera Villarreal  
Co-asesor de Tesis

  
Dr. Hugo Bolio Arceo  
Vice-Presidente de Tecnología- CEMEX  
Revisor

  
Dr. Alberto Pérez Unzueta  
Revisor

  
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
Subdirector de Estudios de Postgrado - Revisor

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N. L., noviembre de 2002

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Ing. Raymundo Rivera Villarreal, jefe del Departamento de Tecnología del Concreto de la Facultad de Ingeniería Civil, al Dr. Tushar K. Das del Programa Doctoral de Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, asesores de la presente investigación, al M. C. Ing. Químico Jorge A. Cabriaes García del Centro de Investigación de Materiales de CEMEX quien coordinó el proyecto ante CEMEX, los cuales invirtieron parte de su tiempo y conocimientos en la realización de la presente investigación, además a la UANL, a CEMEX y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para llevar a cabo mis estudios y elaboración de esta tesis.

También quiero agradecer al M. C. Tomás Coccio de la Facultad de Ciencias de la Tierra, por su participación en la interpretación petrográfica de parte de los materiales puzolánicos.

A todo el personal del Departamento de Tecnología del Concreto y del Centro de Investigación de Materiales de CEMEX, del laboratorio del Programa Doctoral de Ingeniería de Materiales de FIME y a el personal de los laboratorios de la Facultad de Ciencias Químicas y aquellas personas que de alguna forma intervinieron en la realización de este trabajo.

**DEDICADA A:**

**Mi padre**

**Leobardo Valdez Cano**

**La memoria de mi madre**

**Ma. Isidra Tamez de Valdez**



**Mi esposa**

**Verónica Berumen Sada**

**A mis hijas**

**Diana Valdez Berumen  
Sabrina Valdez Berumen**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**La memoria de mis abuelos**

**Hermenegildo Valdez Valdez**

**Ma. Del Carmen Cano e**

**Inés Tamez**

## RESUMEN

**Pedro Leobardo Valdez Tamez**

**Fecha de Terminación: Dic. de 2002**

**Universidad Autónoma de Nuevo León**

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**

**Título de la Tesis:**

**DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA EVALUAR  
MATERIALES NATURALES CON POTENCIAL  
PUZOLÁNICO PARA SU USO EN EL CEMENTO**

**Número de páginas: 121**

**Candidato para el grado de Doctor en  
Ingeniería con Especialidad en Materiales**

**Área de Estudio: Ingeniería de Materiales**

**Propósito y Método del Estudio:** El presente trabajo consistió en investigar la relación existente entre las propiedades físico – químicas - microestructurales de cuatro materiales naturales con propiedades puzolánicas y su reactividad tanto con el hidróxido de calcio grado reactivo como con clinker. Una de ellas con tres diferentes clinker. La información obtenida fue utilizada para realizar una propuesta de evaluación inicial a corto plazo.

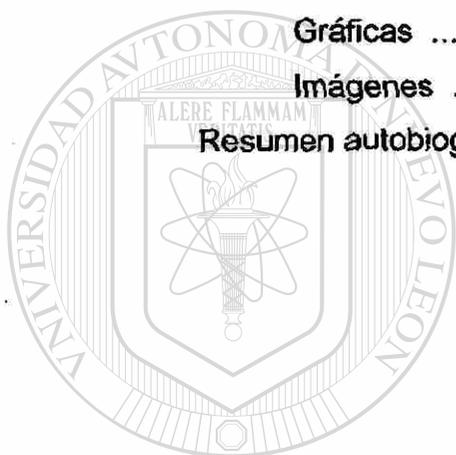
Para la misma fineza de los diferentes materiales puzolánicos, existe una relación directa entre el área superficial, el porcentaje de matriz amorfa y la actividad puzolánica, medida como la resistencia mecánica a la compresión. Para llegar a esta afirmación se realizaron mezclas de las puzolanas con el hidróxido de calcio a las cuales se le determinó su cinética de reacción en base al consumo del hidróxido de calcio en el tiempo. Con los datos de la caracterización físico-química y de la cinética de reacción, mediante las ecuaciones correspondientes podemos establecer la mínima reactividad deseada a los siete días y por consiguiente poder seleccionar las puzolanas de origen natural a estudiar, sin embargo encontramos que aquellos materiales con relativamente alta área superficial requieren cantidades mayores de agua para la misma fluidez en las mezclas con los cementos, lo cual repercute en la potencialidad de los cementos puzolánicos.

El presente trabajo puede ayudar a fijar parámetros de selectividad de los materiales en cuanto a sus propiedades estructurales y físicas, en vez de evaluarlos con su fineza y reactividad puzolánica a los 28 días como hace la ASTM C 618-98, ya que la industria actual requiere menores tiempos para la toma de decisiones.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>Capítulo</b>		<b>Página</b>
1.	Introducción .....	1
1.1	Las Puzolanas Naturales .....	1
1.2	El Cemento Portland y su reacción de hidratación .....	5
1.3	La reacción puzolánica .....	13
2.	Antecedentes .....	18
2.1	Sinopsis sobre el uso de puzolanas naturales .....	18
2.2	Bibliografía sobre puzolanas .....	21
	2.2.1 Generalidades .....	21
	2.2.2 Trabajos específicos .....	23
	2.2.3 Aspectos de Normatividad .....	26
3.	Justificación del proyecto .....	28
4.	Objetivos y metas .....	29
5.	Desarrollo experimental .....	30
5.1	Definición de materiales .....	31
5.2	Preparación de materiales .....	32
5.3	Caracterización de materiales .....	33
5.4	Mezclado de materiales .....	37
	5.4.1 Determinación del yeso óptimo en cementos patrón .....	37
	5.4.2 Optimización de cementos patrón y puzolanas .....	38
5.5	Caracterización de los cementos producidos .....	39
5.6	Caracterización de un cementos producido en planta .....	40
5.7	Pruebas de puzolanicidad con cal .....	41
6.	Análisis y comentarios de los resultados.....	42
6.1	Caracterización .....	42
6.2	Pruebas para determinar SO <sub>3</sub> óptimo .....	46
6.3	Compuestos potenciales de los cementos patrón .....	47
6.4	Cementos patrón .....	47
6.5	Cementos puzolánicos .....	49

6.6	Pruebas de puzolanicidad con cal .....	53
6.7	Pruebas de conductividad eléctrica (método Luxan's) .....	56
6.8	Método propuesto para la evaluación rápida de materiales naturales con posibilidad puzolánica para usarse en la producción de cemento puzolánico .....	57
7.	Conclusiones .....	61
8.	Recomendaciones .....	63
9.	Bibliografía .....	64
<b>Anexos:</b>		
	Tablas .....	70
	Gráficas .....	86
	Imágenes .....	110
	Resumen autobiográfico .....	120



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## LISTA DE FIGURAS

Figura #	Descripción	Página
1.	Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas $C_3S$ – puzolanas .....	16
2.	Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas $C_3A$ - puzolanas, en presencia de yeso y portlandita .....	17
3.	Acueductos romanos .....	19
4.	El Coliseo romano .....	19
5.	El Panteón romano .....	19
6.	Pirámide de los Nichos, en El Tajin .....	20
7.	Representación esquemática del desarrollo experimental .....	30
8.	Representación esquemática de la metodología propuesta para la evaluación rápida de puzolanas naturales para usarse en la producción de cemento puzolánico.....	58

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## LISTA DE TABLAS

Tabla #	Descripción	Página
1.	Fineza y densidades de los materiales .....	70
2.	Diámetro medio de los materiales molidos .....	70
3.	Composición química de los materiales .....	71
4.	Áreas superficiales y porosidades totales, determinadas por adsorción de nitrógeno y analizadas por BET .....	72
5.	Fases minerales y estimación del % de matriz vítrea de Puzolanas .....	72
6.	Descripción petrográfica de las puzolanas .....	73
7.	Combinación de materiales para determinar el contenido óptimo de yeso en cemento patrón "B" .....	74
8.	Combinación de materiales para determinar el contenido óptimo de yeso en cemento patrón "C" .....	74
9.	Compuestos potenciales de los cementos patrón .....	75
10.	Diseño de mezclas de morteros de cementos patrón .....	75
11.	Resistencias a la compresión del cementante CPP 30R .....	76
12.	Diseño de mezclas para determinar el consumo óptimo de puzolanas con el cemento patrón A .....	76
13.	Diseño de mezclas para determinar el consumo óptimo de la puzolana PDB con los cementos patrón B y C .....	77
14.	Resistencias a la compresión del cemento patrón A y con adiciones de 20, 25 y 30 % de las puzolanas PT, PDB, PHCA y PHCP .....	77
15.	Resistencias a la compresión del cemento patrón B y con adiciones de 20, 25 y 30 % de puzolana PDB .....	78

16.	Resistencias a la compresión del cemento patrón C y con adiciones de 20, 25 y 30 % de puzolana PDB .....	78
17.	Índices de actividad a la resistencia entre el cemento patrón A y con adiciones de 20, 25 y 30 % de las puzolana PT, PDB, PHCA y PHCP .....	79
18.	Índices de actividad a la resistencia entre el cemento patrón B y con adiciones de 20, 25 y 30 % de puzolana PDB .....	79
19.	Índices de actividad a la resistencia entre el cemento patrón C y con adiciones de 20, 25 y 30 % de puzolana PDB .....	80
20.	Áreas superficiales de los cementantes obtenidas por método de permeabilidad al aire "Blaine" .....	81
21.	Consistencia normal y tiempos de fraguado Vicat para cada cementante .....	82
22.	Proporciones para la elaboración de morteros cal-puzolana y su resistencia a la compresión a los 7 días .....	83
23.	Cinética de reacción puzolánica en pastas cal-puzolana .....	84
24.	Conductividades iónicas de mezclas "puzolanas naturales-solución 0.5 % de NaOH" "MÉTODO LUXAN'S" .....	85

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

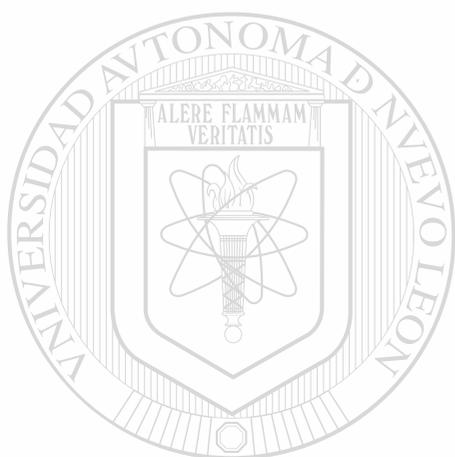
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica #	Descripción	Página
1.	Distribución de tamaño de partículas de las puzolanas del yeso y cementantes patrón .....	86
2.	Distribución de tamaño de partículas de las puzolanas .....	87
3.	Espectros del análisis de DRX de las puzolanas .....	88
4.	Resistencia a la compresión de cubos fabricados con diferentes dosis de yeso para determinar el contenido óptimo de SO <sub>3</sub> en el cemento patrón B .....	89
5.	Resistencia a la compresión de cubos fabricados con diferentes dosis de yeso para determinar el contenido óptimo de SO <sub>3</sub> en el cemento patrón C .....	90
6.	Desarrollo de la resistencia mecánica a la compresión de cementantes patrón .....	91
7.	Desarrollo de la resistencia mecánica a la compresión del cemento A y las sustituciones del 20, 25 y 30% por puzolana PT .....	92
8.	Desarrollo de la resistencia mecánica a la compresión del cemento A y las sustituciones del 20, 25 y 30% por puzolana PDB .....	93
9.	Desarrollo de la resistencia mecánica a la compresión del cemento A y las sustituciones del 20, 25 y 30% por puzolana PHCA .....	94
10.	Desarrollo de la resistencia mecánica a la compresión del cemento A y las sustituciones del 20, 25 y 30% por puzolana PHCP .....	95

11.	Desarrollo de la resistencia mecánica a la compresión del cemento B y las sustituciones del 20, 25 y 30% por puzolana PDB .....	96
12.	Desarrollo de la resistencia mecánica a la compresión del cemento C y las sustituciones del 20, 25 y 30% por puzolana PDB .....	97
13.	Tiempos de fraguado Vicat en cemento patrón A y en mezclas de cemento patrón A y puzolanas .....	98
14.	Tiempos de fraguado Vicat en cementos patrón B y C y cada sustitución respectiva de la puzolana PDB en ambos cementos .....	99
15.	Porcentaje de Cal libre en pastas cal-puzolanas .....	100
16.	Espectros de DRX de polvos de pastas obtenidas de mezclas cal y puzolana PT .....	101
17.	Espectros de DRX de polvos de pastas obtenidas de mezclas cal y puzolana PDB .....	102
18.	Espectros de DRX de polvos de pastas obtenidas de mezclas cal y puzolana PHCA .....	103
<hr/>		
19.	Espectros de DRX de polvos de pastas obtenidas de mezclas cal y puzolana PHCP .....	104
20.	Definición cualitativa de zonas de consumo de las fases reactivas de la puzolana PT .....	105
21.	Definición cualitativa de zonas de consumo de las fases reactivas de la puzolana PDB .....	106
22.	Definición cualitativa de zonas de consumo de las fases reactivas de la puzolana PHCA .....	107
23.	Definición cualitativa de zonas de consumo de las fases reactivas de la puzolana PHCP .....	108

24. Relación entre el área superficial y la actividad puzolánica con cal de las puzolanas .....	109
---	-----



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

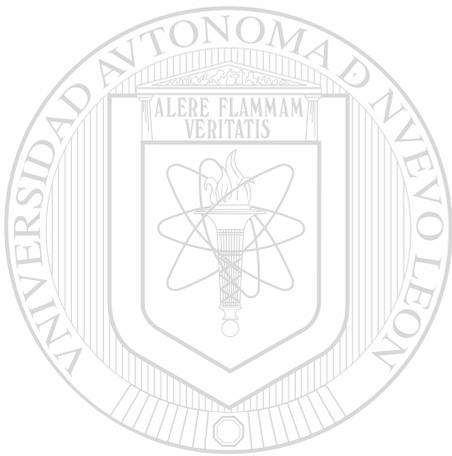


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## LISTA DE IMÁGENES

Imagen #	Descripción	Página
1.	Triturador de quijadas .....	110
2.	Pulverizador .....	110
3.	Molino de bolas .....	110
4.	Cuartheador .....	111
5.	Homogenizador Leeson .....	111
6.	Equipo de Fluorescencia de rayos X (FRX) .....	111
7.	Perlificadora .....	112
8.	Equipo Siemens 5000 utilizado para realizar la prueba de difracción de Rayos X (DRX) .....	112
9.	Microscopio para observación de secciones delgadas .....	112
10.	Equipo utilizado en pruebas de adsorción de nitrógeno .....	113
11.	Equipo utilizado en la determinación de la cal libre .....	113
12.	Microscopio electrónico de barrido .....	113
13.	Mezcladora estándar utilizada en la fabricación de pastas y morteros .....	114
14.	Mesa y equipo utilizada para obtener la fluidez de morteros ..	114
15.	Cámara de curado estándar .....	114
16.	Pila de curado, con temperatura controlada .....	115
17.	Equipo Blaine requerido para determinar el área superficial ..	115
18.	Cámara de curado para morteros y pastas fabricados con cal	115
19.	Material PT en greña .....	116
20.	Microfotografía del material PT en greña .....	116
21.	Microfotografía del material PT molido en molino de bolas ....	116
22.	Material PDB en greña .....	117
23.	Microfotografía del material PDB en greña .....	117

24.	Microfotografía del material PDB molido en molino de bolas ..	117
25.	Material PHCP en greña .....	118
26.	Microfotografía del material PHCP en greña .....	118
27.	Microfotografía del material PHCP molido en molino de bolas	118
28.	Material PHCA en greña .....	119
29.	Microfotografía del material PHCA molido en molino de bolas	119



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Las Puzolanas Naturales

El **concreto** es el material de construcción más ampliamente utilizado en el mundo. Se estima que el concreto se utiliza cinco veces más en peso que el acero. En algunos países, este porcentaje excede la proporción de 10 a 1. El consumo de concreto hoy en día es aproximadamente **dos toneladas por cada ser humano por año**, sin embargo, hay que aclarar que para producir una tonelada de cemento estamos produciendo también una tonelada de CO<sub>2</sub> (1). Se estima que las plantas productoras de clinker producen el 7% del total de producción mundial del CO<sub>2</sub> del planeta, siendo por consiguiente un contribuidor de los gases de efecto invernadero (2).

Este material tan versátil, manejable, moldeable, etc., se produce fácilmente; sólo se requiere una mezcla de **cementante**, agua, grava y arena para producirlo. Al cabo de unas cuantas horas tenemos una masa que ha fraguado y endurece paulatinamente a la cual podemos clasificar como una "roca artificial". Conforme evolucionan la ciencia y los cambios tecnológicos, se ha demostrado que este material puede ser susceptible a una serie de fenómenos físico-químicos que afectan su durabilidad y pueden llevar a la destrucción de las estructuras de concreto reforzado.

En nuestros tiempos, tenemos la tecnología para estudiar gran parte de los factores y mecanismos que pueden originar baja durabilidad del concreto, esto incluye el estudio de cada uno de los componentes del concreto, sus reacciones físico-químicas en el proceso de fraguado y endurecimiento, su comportamiento mecánico bajo las cargas de servicio, así como su comportamiento en las condiciones ambientales de exposición a las cuales trabajará.

Hoy en día no podemos hablar de concretos sin mencionar que estos contengan algún tipo de aditivo o complemento cementante. El deterioro de nuestro planeta por la contaminación de la atmósfera y la no planeación de procesos o productos sustentables ha impulsado a que la industria cementera esté cambiando en la búsqueda de una mejora continua, disminuyendo los consumos de energía en sus procesos y utilizando complementos cementantes ya sean naturales o artificiales. Los complementos cementantes reducen los consumos de clinker, ahorrando energía, produciendo menos gases de efecto invernadero a la atmósfera y generando por lo tanto procesos más sustentables.

La palabra **puzolana** se acuñó en Italia y se utilizó para describir las cenizas volcánicas de "Pozzouli", una villa cerca de Nápoles. Las cenizas provenían de las erupciones del volcán Vesubio.

Las **puzolanas de origen natural** son derivadas de erupciones volcánicas, excepto las tierras diatomáceas, las cuales están formadas por silicatos amorfos hidratados derivados de los esqueletos de microorganismos acuáticos. Los materiales de las erupciones volcánicas esta compuestos principalmente de aluminosilicatos que al enfriarse bruscamente, resultan en la formación de materiales con estructura desordenada o vítrea con minerales pobremente cristalinos.

Una clasificación general de las puzolanas naturales de origen volcánico basado en sus constituyentes reactivos incluye a los vidrios volcánicos y tobas volcánicas.

Los **vidrios volcánicos** que han sufrido alteración hidrotermal los podemos denominar como **zeolitas**, y éstas las podemos encontrar como tobas, las cuales son estratos de materiales compactos de depósitos volcánicos.

Existen también otros materiales como las **arcillas y pizarras** que pueden tener potencialidad puzolánica después de un tratamiento térmico entre 800 y 900 °C, ya que con esta energía se logra transformar su estructura cristalina en estructura amorfa o desordenada, un producto obtenido de la arcilla caolinítica de alta pureza es el **metacaolín**, el cual tiene alta actividad puzolánica.

Conforme a su génesis, hay materiales de origen ígneo como las tobas reolíticas y las tobas dacíticas que han demostrado tener buena pozolanicidad, mientras que las andesitas, basaltos y tobas basálticas generalmente no demuestran puzolanicidad satisfactoria (3).

Existen 1282 volcanes alrededor del mundo que son considerados por haber tenido actividad en los pasados 10,000 años, esto trae como resultado la generación de bancos de materiales alrededor del mundo con probabilidad puzolánica disponibles para su uso en la producción de cementos puzolánicos o para la producción de concretos conteniendo estos materiales (4).

La norma ASTM 618 (American Society for Testing and Materials) define a las **puzolanas**, como aquellos materiales silico o silico-aluminosos, los cuales por si solos poseen poco o nulo valor cementante, pero finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con la **portlandita** (hidróxido de calcio  $\{Ca(OH)_2\}$ ) a temperatura ordinaria para formar compuestos con propiedades cementantes (5).

La utilización de las puzolanas en el concreto trae beneficios en el aspecto de la durabilidad ya que; aumenta la impermeabilidad, aumenta la resistencia al ataque de sulfatos (6), aumenta la trabajabilidad, aumenta la resistencia mecánica a edades avanzadas, reduce la reacción álcali-agregado y por lo tanto, todo esto redunda en un beneficio económico al disminuir el consumo de cemento portland para la misma resistencia mecánica, por lo

mismo, ahorrando energía y produciendo menores emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, haciendo el proceso sustentable.

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 estas, entre otras puzolanas artificiales podemos citar a la **ceniza volante**, proveniente de la quema del carbón utilizado en las plantas generadoras de energía eléctrica, el **humo de sílice**, proveniente de la industria de aleaciones de ferro-silicio, las **escorias de fundición**, provenientes de la industria metalúrgica, ceniza de la quema de la **cascarilla de arroz**. Cabe mencionar que algunas de ellas pueden tener propiedades de reactividad por si solas al tener más de un 10% de cal (CaO), por consiguiente se debe de mencionar que son cementantes además de puzolanas.

El profesor **Kumar Metha** de la Universidad de Berkeley, menciona que la producción total de los complementos cementantes de fuentes metalúrgicas y plantas termoeléctricas es alrededor de 500 millones de toneladas por año (7).

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 1.2 El Cemento Portland y su Reacción de Hidratación

El cemento portland esta definido por la norma ASTM C 150 como un conglomerante hidráulico producido al pulverizar el clinker que consiste esencialmente de silicatos de calcio, conjuntamente con una o más formas de sulfato de calcio. El clinker es producido por una mezcla de materiales sinterizados a aproximadamente 1400° 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>.

Dentro de la química del cemento se ha acostumbrado expresar los óxidos y los compuestos principales del clinker utilizando las siguientes abreviaturas.

Óxido	Abreviatura	Compuesto	Abreviatura
CaO	C	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
SiO <sub>2</sub>	S	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
MgO	M	Ca(OH) <sub>2</sub>	CH
SO <sub>3</sub>	Š	4CaO.3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SO <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> Š
H <sub>2</sub> O	H	3CaO.2 SiO <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub>
		CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	CŠH <sub>2</sub>

La composición teórica o potencial de los compuestos del cemento portland o fases minerales se puede estimar através de la ecuaciones de **Bogue**, dichas ecuaciones están incluidas en norma ASTM C 150 y suponen que las reacciones químicas de la formación de los compuestos del clinker, han avanzado hasta su equilibrio termodinámico, y que la presencia de impurezas tales como el MgO y los álcalis puede ser ignorada. **Ambas suposiciones no son válidas**, por lo tanto, en algunos casos la composición calculada del compuesto, especialmente las cantidades de C<sub>3</sub>A y C<sub>4</sub>AF en los cementos, se

sabe que se desvían de la composición real del compuesto determinada directamente. Esta es la razón de que la composición calculada del compuesto sea también llamada **composición potencial del compuesto (8)**.

El fraguado y el endurecimiento del cemento portland ocurre como un resultado de la **reacción de hidratación** entre los compuestos del clinker, el yeso y el agua, la cual genera calor que es conocido como calor de hidratación. Estas reacciones se producen a diferentes tasas de velocidad y están influenciadas unas con otras.

Las fases del cemento portland que participan en este proceso son:

- **Alita.** Solución sólida de silicato tricálcico ( $C_3S$ ) dopado con impurezas iónicas
- **Belita.** Solución sólida de silicato dicálcico ( $C_2S$ ) dopado con impurezas iónicas
- Solución sólida de **aluminato tricálcico ( $C_3A$ )**
- **Ferrita.** Ferro aluminato de calcio ( $C_4AF$ )
- Oxido de calcio libre ( $CaO$ )
- Sulfatos alcalinos
  - Sulfato de calcio en forma de anhidrita, hemihidrato o dihidrato.
- Agua de mezclado

El  $C_3S$  y  $C_2S$  son dos fases de silicatos cristalinos, teniendo a las fases  $C_3A$  y  $C_4AF$  como **fases intersticiales**, así mismo se tienen algunas impurezas como la periclasa ( $MgO$ ), cal viva ( $CaO$ ) y sulfatos alcalinos ( $Na_2SO_4$  y  $K_2SO_4$ ).

Es de suma importancia mencionar que las diversas etapas de producción del clinker tienen un papel determinante en la reactividad del material, ya que por ejemplo la viscosidad de la fase intersticial en la zona de sinterización define la dispersión del  $C_3S$  y  $C_2S$  o las concentraciones de ellos en alguna área

específica del clinker. Por otro lado la temperatura en la zona de clinkerización y el gradiente térmico de enfriamiento tienen un efecto en la cristalinidad del  $C_3A$  y  $C_4AF$ .

La **alita** es la fase principal y más importante del cemento portland, ya que controla el fraguado y el endurecimiento. Su hidratación es rápida pero varía en función de la cantidad de iones en solución que contenga.

La **belita** puede existir en cinco formas estructurales diferentes, la forma más importante en la química del cemento es la  $\beta$ - $C_2S$  se hidrata mucho más lentamente que la alita.

Tanto la alita como la belita producen los mismos tipos de **silicatos de calcio hidratados** (C-S-H) y son las principales fases generadoras de la portlandita ( $Ca(OH)_2$ ), la cual es la base de la reacción puzolánica.

El  $C_3A$  usualmente tiene una estructura cúbica, sin embargo a mayores cantidades de álcalis puede tener modificaciones a ortorrómbica o monoclinica. Dicha fase es la que genera mayor calor de hidratación y ésta depende también de la cantidad y calidad de los iones alcalinos que se encuentran en su estructura (9). La hidratación de ésta fase es también afectada por la disolución de los sulfatos presentes.

El  $C_4AF$  forma productos similares a aquellos del  $C_3A$ , donde el hierro sustituye parcialmente la alúmina en la estructura del cristal de etringita y monosulfoaluminato hidratado.

El **sulfato de calcio** es añadido al cemento portland para controlar el tiempo de fraguado, para mantener una estabilidad volumétrica y en una proporción adecuada para desarrollar en la pasta de cemento portland la máxima resistencia mecánica a la compresión. El  $C_3A$  en la presencia de sulfato

de calcio se transforma en **etringita** ( $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ). La primera capa de etringita al parecer precipita en la superficie del grano de  $C_3A$  y será un obstáculo impermeable para evitar la hidratación adicional del mismo, sin embargo, en el avance de la hidratación, la etringita puede ser transportada y colocada fuera de la partícula de  $C_3A$ , haciendo que se pierda consistencia de la pasta de cemento. Por otro lado la cantidad máxima permitida de sulfato en el concreto depende de muchos factores, incluyendo el contenido de  $C_3A$ , la temperatura de curado, el tamaño de las partículas del yeso y la presencia de cloruros en la mezcla, si excedemos esta cantidad, la generación de etringita puede causar expansión y agrietamientos en el concreto.

**El 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  $SO_4^{-2}$ .

**La portlandita** o hidróxido de calcio cristalino es el **segundo producto más abundante** en las pastas de cemento hidratado y puede ser distinguido fácilmente por medio de microscopía óptica, ya que al precipitarse se presenta en forma de pequeños cristales relativamente largos por toda la matriz de cemento hidratado, la portlandita **no aporta ningún beneficio a la resistencia mecánica** de la pasta de cemento y puede producir espacios porosos, ya que al no ser hidráulica puede lixiviarse y salir del concreto, por esta razón se busca hacerla reaccionar con la puzolana y convertirla en un producto más resistente.

El progreso del proceso de la hidratación depende de (9):

- La tasa de disolución de las fases participantes
- La tasa de nucleación y crecimiento del cristal de los productos de hidratación formados

- La tasa de difusión del agua y los iones disueltos a través del material ya hidratado.

Existen diferentes propuestas para describir el proceso de hidratación, usaremos el propuesto por C. Vernet (1995), el cual es descrito en cinco etapas que se resumen a continuación (10):

### **Etapas I: Periodo de Mezclado**

Durante esta etapa, los diferentes iones liberados por las diversas fases entran en solución, esto es rápido y de carácter exotérmico. **La superficie de las partículas del cemento** es parcialmente cubierta con **silicatos de calcio hidratados** formados por la combinación de iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{-2}$  y  $\text{OH}^-$ , originados de los silicatos de las fases del clinker, así como por la **etringita** ( $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , una sal de trisulfoaluminato de calcio hidratado, ) formada por la combinación de iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{AlO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{+2}$  y  $\text{OH}^-$ , los cuales son originados de las fases intersticiales y de las diferentes formas de los sulfatos de calcio que están presentes en el concreto.

---

### **Etapas II: Periodo de Aletargamiento**

En el periodo de aletargamiento se incrementa rápidamente el contenido de iones  $\text{Ca}^{+2}$  y el pH en el agua de mezclado, al grado de obstaculizar la disolución de las fases del clinker. **La generación de calor decae considerablemente**, pero no se detiene. Una pequeña cantidad de C-S-H se forma durante este periodo, y si hay un balance adecuado entre los iones de aluminio y sulfato, se reduce la cantidad de etringita o se forma la fase de hidrogranates. Durante este periodo la fase acuosa llega a ser saturada de iones  $\text{Ca}^{+2}$ , pero **no hay precipitación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$** , probablemente debido a su baja tasa de generación en comparación con la del C-S-H. Algo de floculación de los granos de cemento puede ocurrir durante este proceso.

### **Etapa III: Fraguado Inicial**

La reacción de hidratación es bruscamente activada cuando la portlandita comienza a precipitar. Esto ocurre cuando prácticamente no hay silicatos en la fase acuosa. El consumo repentino de los iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{OH}^-$  acelera la disolución de los componentes aun no disueltos del cemento portland. La generación de calor se incrementa lentamente al principio (debido a que la precipitación de la portlandita es endotérmica y consume algo de calor) y llega a ser más rápida en la etapa posterior.

Usualmente, el fraguado inicial cae en este periodo, excepto cuando algo de rigidez del mortero ocurre debido al desarrollo de las agujas de etringita y algo de C-S-H. Las fases hidratadas de silicatos y aluminatos empiezan a crear algo de adherencia entre las partículas que se han generado, resultando en una rigidez progresiva de la pasta de cemento.

---

### **Etapa IV: Endurecimiento**

En la mayoría de los cementos portland hay menos sulfato de calcio que la cantidad necesaria para reaccionar con la fase de aluminatos, además que durante el fraguado los iones  $\text{SO}_4^{-2}$  son inicialmente consumidos por la formación de la etringita. Esto usualmente ocurre entre las 9 y las 15 horas después del mezclado inicial. En este tiempo, la etringita llega a ser la fuente de los sulfatos para formar monosulfualuminato con la fase de aluminato remanente. Esta reacción genera calor y resulta en la aceleración de la hidratación de las fases de silicatos.

Los productos de hidratación formados durante estas primeras etapas son a menudo referidos a productos externos porque ellos crecen en la parte exterior de los granos de cemento en la fase acuosa intersticial. Ellos aparecen como una red porosa de fibras de C-S-H, agujas de etringita, placas de monosulfoaluminato y cristales hexagonales apilados de portlandita.

### **Etapa V: Retardo**

En esta etapa, los granos de cemento se han cubierto por una capa de hidratos, los cuales cada vez son más gruesos, y es más difícil para las moléculas de agua alcanzar la parte de las partículas de cemento aun no hidratadas a través de esta capa. La hidratación es disminuida principalmente debido a que la tasa de difusión es controlada por las moléculas de agua a través de las capas de hidratos, y la pasta de cemento hidratado aparece como una pasta masiva compacta amorfa conocida como producto interno.

La hidratación del cemento portland también se detiene cuando no hay más fase anhidra o cuando el agua no alcanza las fases sin hidratar o cuando no hay más agua disponible.

**Los cationes alcalinos** normalmente ocurren en los cementos como sulfatos o están presentes en las principales fases del cemento portland. En general con la presencia de estos iones la resistencia a edad temprana de la pasta se incrementa y la resistencia tardía se disminuye (11).

La **fineza de los cementos** generalmente se determina por el método de permeabilidad al aire "Blaine" y expresa su área superficial. El área superficial típica para cementos portland ordinarios tiene un rango típico entre 280 y 350 m<sup>2</sup>/kg, mientras que para cementos con alta resistencia inicial pueden ser molidos a áreas superficiales entre 450 y 500 m<sup>2</sup>/kg, **esta mayor área superficial contribuye a un aceleramiento en la hidratación del cemento,**

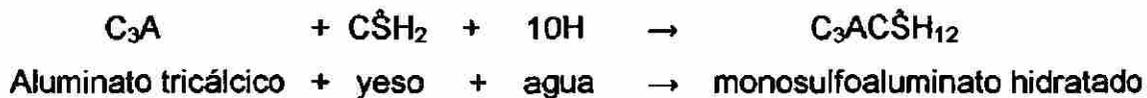
pero también incrementa su requerimiento de agua (12) para una misma consistencia.

Los compuestos potenciales reaccionan con el agua para producir los productos de reacción como sigue (13):



En un cemento portland totalmente hidratado, la portlandita generada constituye de un 20 a un 25% del contenido sólido (14), esta cantidad será considerada para evaluar la combinación de las diferentes puzolanas en el diseño de nuestra experimentación.

Como ya se ha mencionado, la reacción del  $C_3A$  con el agua es muy rápida e involucra reacciones con los iones suministrados por la disolución del yeso y puede ser representada como sigue:



El  $C_4AF$  forma productos similares a aquellos del  $C_3A$ , donde el hierro sustituye parcialmente la alúmina en la estructura del cristal de etringita y mosulfoaluminato hidratado.

### 1.3 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 liberado 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 portlandita, la cantidad de agua combinada y el grado de reacción de los componentes.

La heterogeneidad de la familia de las puzolanas así como el fenómeno complejo que ocurre durante la hidratación, **no permite definir un modelo de actividad puzolánica**, únicamente permite tener una tendencia general para ser evaluada (15), lo cual es parte de la tarea a la cual nos hemos enfrentado en el presente trabajo.

Los diferentes factores que debemos de 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/CM de la mezcla
- Tiempo y tipo de curado
- Temperatura de curado

El principal producto de la reacción puzolánica es la fase C-S-H, que es similar al producido en la reacción del agua con el cemento portland y que

contribuye **adicionalmente** a la resistencia mecánica de las pastas, especialmente a **edades avanzadas de hidratación**. Cabe señalar que parte de los álcalis que participan en la reacción puzolánica y que fueron liberados en la reacción de hidratación quedan **adsorbidos** en la estructura de los C-S-H, lo que también contribuye a disminuir la reacción álcali agregado en el concreto.

Al igual que en las pastas de cemento portland, en la reacción de hidratación de cementos mezclados con puzolanas, podemos encontrar productos de reacción muy similares a los encontrados en las pastas del cemento portland sin puzolanas, la diferencia entre las fases encontradas involucra la variación en la relación de sus componente y su morfología. Los hidratos encontrados en la pasta endurecida son:

- C-S-H (silicato de calcio hidratado)
- $C_2ASH_8$  (hidrato de gelenita)
- $Ca(OH)_2$  (hidróxido de calcio)
- $CaCO_3$  (carbonato de calcio)
- Etringita

---

- Hidratos de aluminato de calcio

- Monosulfoaluminato

Takemoto y Uchikawa (16), proponen como mecanismo principal de reacción puzolánica una **disolución controlada por difusión** y describen las reacciones que existen entre las fases de  $C_3S$  y  $C_3A$  y la puzolana. En el sistema  $C_3S$ -puzolana, los iones de calcio disueltos se mueven libremente en el líquido y son adsorbidos en la superficie de las partículas de la puzolana. El C-S-H formado por la hidratación del  $C_3S$  precipita como hidratos de alta relación Ca/Si sobre la superficie del grano de  $C_3S$  y como hidrato poroso con baja relación Ca/Si sobre la superficie de la partícula puzolánica ya que ésta ha sufrido disolución. El ataque de la superficie de la puzolana en agua trae consigo una disolución gradual de iones  $Na^+$  y  $K^+$ , resultando una capa amorfa sobre la

superficie de la puzolana rica en Si y Al. Los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  disueltos incrementan la concentración  $\text{OH}^-$  y aceleran la disolución de los iones  $\text{SiO}_4^{4-}$  y  $\text{AlO}_2^-$ , que se combinan con los  $\text{Ca}^{2+}$  disueltos para incrementar el espesor de la capa amorfa. Debido a la presión osmótica, la capa se hincha gradualmente, dejando además un hueco entre la capa y la partícula de la puzolana. Cuando la presión osmótica rompe la capa, los iones  $\text{SiO}_4^{4-}$  y  $\text{AlO}_2^-$  se difunden en la solución rica en iones  $\text{Ca}^{2+}$ , trayendo como consecuencia la generación de adicionales hidratos de C-S-H y Ca-Al que se precipitan sobre la superficie de los hidratos del  $\text{C}_3\text{S}$ . Los huecos permanecen en el interior de capa ya que los hidratos no precipitan ahí debido a la alta concentración de los álcalis. Las puzolanas con bajo contenido de álcalis permiten la disolución de la capa amorfa que es rica en Si y Al, originando que los iones  $\text{Ca}^{2+}$  se muevan en el hueco anteriormente formado y se precipiten como hidratos de silicatos y aluminatos de calcio sobre la superficie de la partícula de la puzolana.

Para el caso del sistema  $\text{C}_3\text{A}$  – puzolana, en la presencia de hidróxido de calcio y yeso, la presencia de la puzolana acelera la hidratación del  $\text{C}_3\text{A}$  por la adsorción de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  de la fase líquida y por proveer sitios de precipitación para la etringita y otros hidratos. La reacción de este sistema es similar al sistema  $\text{C}_3\text{S}$  – puzolana explicado anteriormente. La etringita, el monosulfoaluminato hidratado, los hidratos de aluminato de calcio e hidratos de silicato de calcio son formados sobre la superficie exterior de la capa fuera de la partículas de la puzolana o sobre la capa hidratada de la partícula de  $\text{C}_3\text{A}$ , dependiendo de la concentración de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en la solución.

En las figuras 1 y 2 se muestran los diagramas esquemáticos del mecanismo de hidratación en sistemas  $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_3\text{A}$  con la puzolana.

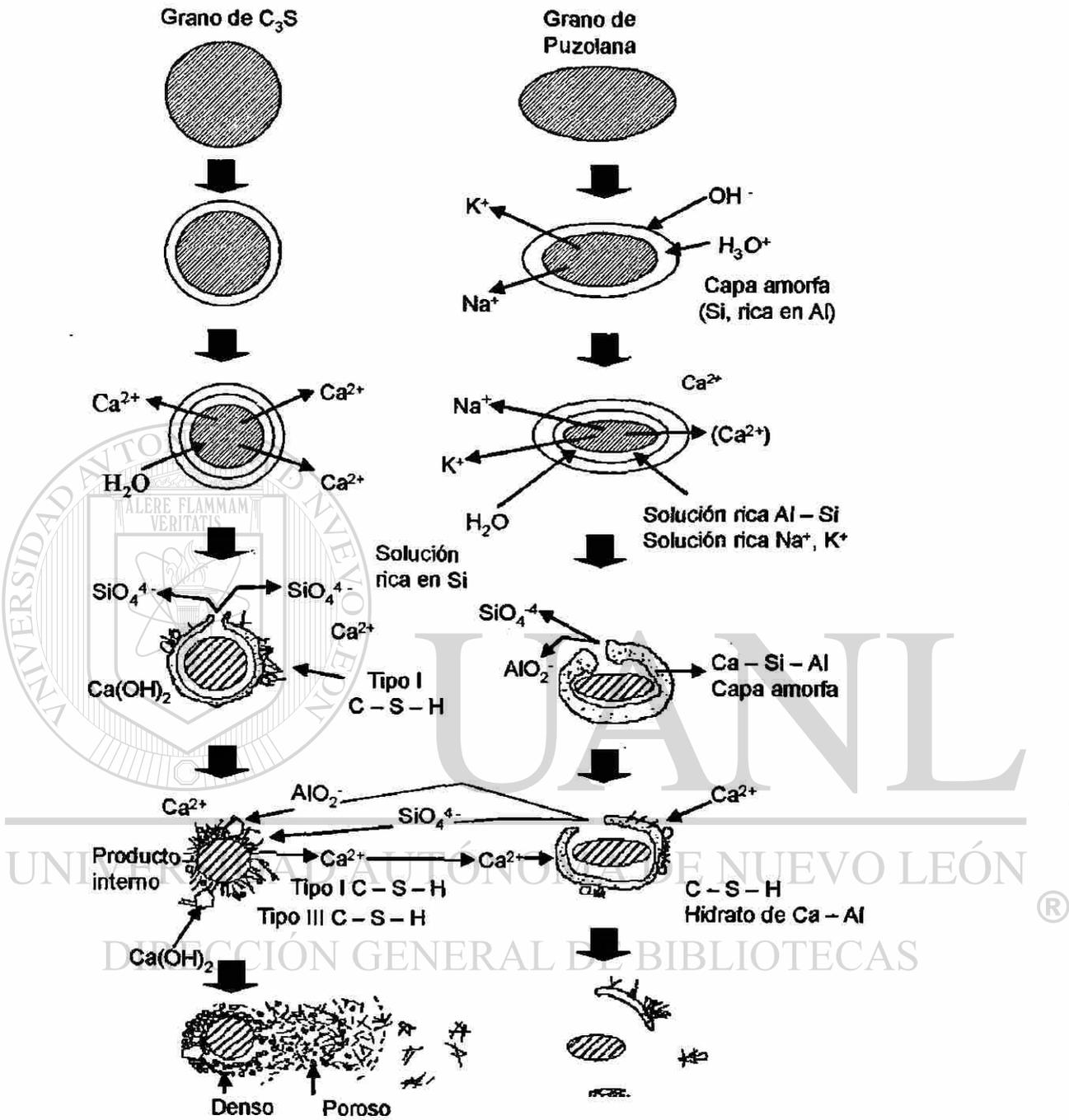


Fig 1. Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas  $C_3S$ -puzolanas (16)

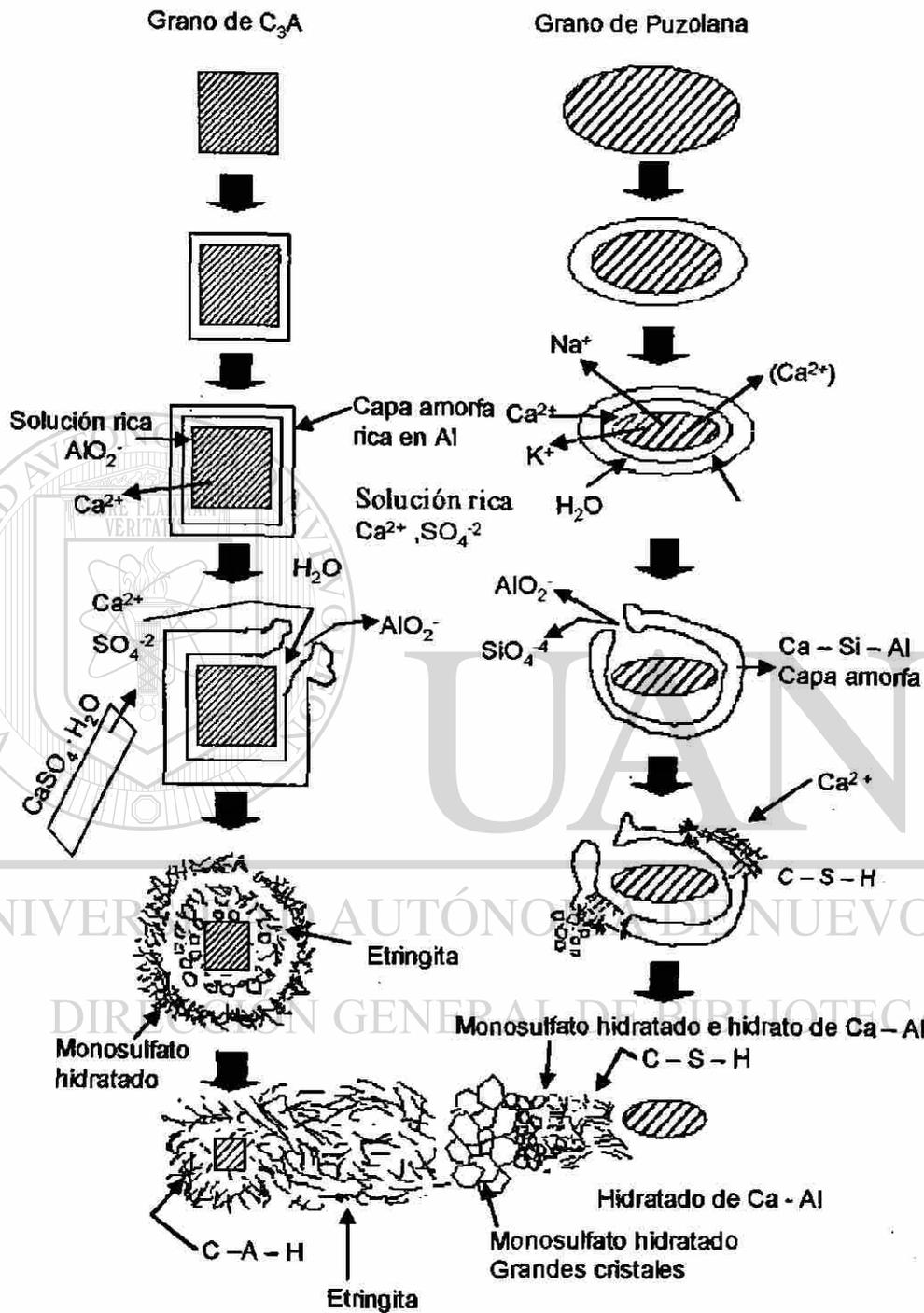


Fig 2. Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas  $C_3A$ -puzolanas, en presencia de yeso y portlandita (16).

## **2. Antecedentes**

### **2.1 Sinopsis sobre el Uso de Puzolanas Naturales**

La cal y la caliza son materiales prehistóricos utilizados con fines constructivos, entre las construcciones que utilizaron la caliza se podrían mencionar a las pirámides de Egipto, lo cual data de más de 4500 años. Los egipcios utilizaron yeso calcinado impuro para unir los bloques de sus pirámides. Los Romanos utilizaron la cal para aplanados sobre mampostería.

El siguiente material utilizado fue la puzolana natural que fue combinada con cal.

Entre los años 1500 y 1600 A. C. en la Isla de Thera, ahora Santorini, Grecia, las erupciones volcánicas violentas produjeron materiales puzolánicos y con ellos, los constructores griegos fabricaron morteros al combinarla con cal (17). Cabe mencionar que en esta erupción el volumen de material expulsado fue alrededor de 30 km<sup>3</sup>.

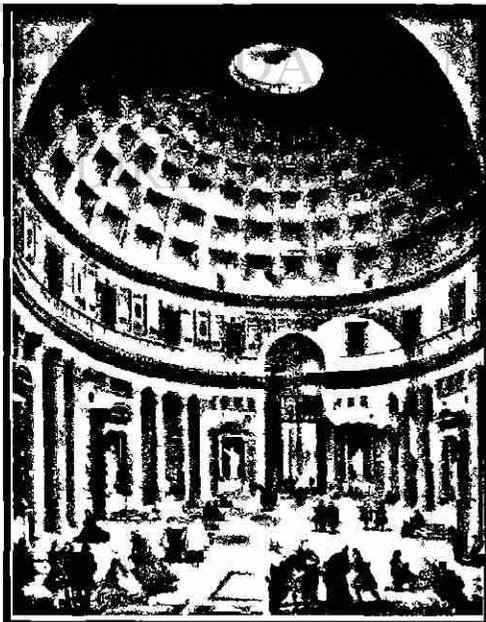
En el 79 D. C. la erupción del Vesubio en Italia, destruyó Pompeya, Herculam y otras ciudades a lo largo de la bahía de Nápoles. El material de la erupción fue utilizado por los romanos para construir obras que hoy en día se mantienen en pie dando un ejemplo sobre la durabilidad en la construcción. Entre las principales obras de los romanos podemos mencionar el Panteón, el Coliseo, sus caminos y los Acueductos (Fig. 3, 4 y 5). Durante los 600 años del dominio de los romanos utilizaron una variedad de puzolanas en sus construcciones a través de su imperio.



**Fig 3. Acueductos romanos**



**Fig 4. El Coliseo romano**



**Fig 5. Panteón romano, con muros de 6 m de espesor conteniendo tobas volcánicas y el domo es 43.5 m de claro, conteniendo pumicita**

La cultura de los Totonacas en México, floreció entre los años 100 y 1100 D. C., ellos utilizaron puzolanas para construir techos planos y ligeros en sus palacios y en sus edificios administrativos en la zona conocida como "El Tajin Chico", en la ciudad prehispánica del Tajin, considerada por la UNESCO como patrimonio de la humanidad (18).

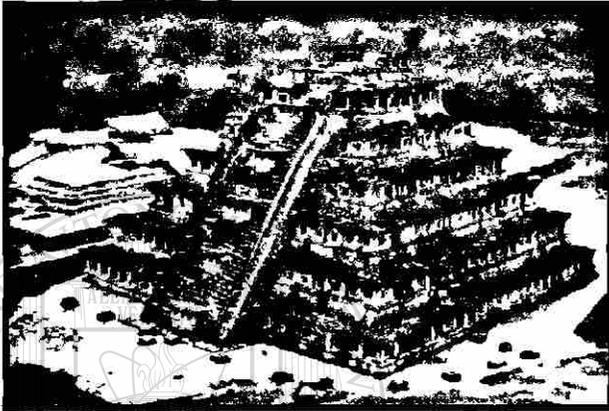


Fig 6. Pirámide de los Nichos, en El Tajin.

Las civilizaciones de la India y los egipcios se familiarizaron con los morteros y concretos resistentes al agua hechos con cementos cal-puzolana, la fuente de la puzolana siendo ladrillos, tejas y material de alfarería triturada y calcinada.

El descubrimiento de la **cal hidráulica** en el siglo XVIII fue la precursora de la invención del cemento portland, cambiando el uso de la cal y de la cal-puzolana por este nuevo material, y fue hasta 1824 cuando se patentó el cemento portland por **Joseph Aspdin** (19), esta fecha fue el parte aguas para la generación de los nuevos morteros y concretos que aunados al avance de la tecnología del concreto se han usado alrededor del mundo para lograr construcciones de concreto sustentable.

## 2.2 Bibliografía sobre Puzolanas

### 2.2.1 Generalidades

En años recientes las investigaciones en el área de las puzolanas se han enfocado principalmente en el estudio de los subproductos industriales, debido a que los países desarrollados y con mayores recursos para la investigación están generando en cantidades importantes estos materiales, sin embargo, existen investigadores que han mantenido sus líneas de investigación en lo que respecta a las puzolanas naturales, esto involucra sobre todo a aquellos países donde se tienen grandes yacimientos como el caso de Italia, México, Francia, Grecia, Chile, etc., donde se utilizan ampliamente.

Un investigador de Italia reconocido en el estudio de las puzolanas de origen natural es **Franco Massazza**, quien ha experimentado por más de 30 años con estos materiales, desde su caracterización hasta su reactividad ya sea con cal o su reactividad como cementos mezclados. Ha estudiado en forma importante aspectos de durabilidad (20, 21, 22, 23), además es el autor del capítulo 10 (Puzolana y Cementos Puzolánicos) de uno de los libros más utilizados en el área del cemento y del concreto "Lea's, Chemistry of Cement and Concrete".

Otro investigador con gran visión ha sido el **Dr. V. M. Malhotra**, de **CANMET** (Canada Centre for Mineral and Energy Technology), quien conjuntamente con el **American Concrete Institute (ACI)** ha sido el organizador de conferencias internacionales para tratar de incrementar el conocimiento en lo referente a la ceniza volante, humo de sílice, escorias y puzolanas naturales. La primera conferencia fue realizada en Montebello, Québec, Canadá en 1983, siguiendo con España en 1986, Trondheim, Noruega en 1989, en Estambul, Turquía en 1992, en Milwaukee, Estados Unidos en 1995, en Bangkok, Tailandia

en 1998, en Madras (Chenai), India en 2001. El Dr. Malhotra ha sido el editor de las memorias de esta serie de publicaciones especiales, sin embargo, el aporte relativo a las puzolanas naturales en estos eventos ha sido poco y la mayoría de los trabajos han sido orientados a las propiedades físico-mecánicas de estas puzolanas en el concreto.

El **Comité 232 del ACI** denominado "Use of Natural Pozzolans in Concrete" (Uso de Puzolanas Naturales en el Concreto), en su publicación, presenta información general de estos materiales, sin embargo se aplica al uso del concreto y no a la producción de cementos puzolánicos, así mismo la Portland Cement Association (PCA) tiene un documento denominado "Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cement" (Materiales Cementantes Suplementarios para uso en Cementos Mezclados)(24), en el cual se da información general de los materiales puzolánicos, pero solo una pequeña parte se dedica a las puzolanas Naturales.

En México diferentes investigadores han trabajado con puzolanas naturales, entre otros podemos citar a **Ramón Poo**, quien trabajó con puzolanas naturales como inhibidores de la reacción álcali-agregado (25), o al **Dr. Raymundo Rivera Villarreal**, que ha trabajado con puzolanas naturales en combinación con aditivos, puzolanas naturales en concretos de origen prehispánico (26), además ha organizado diferentes eventos en nuestro estado sobre la tecnología del concreto. Por parte de CEMEX, **Uribe-Afif y Rodríguez-Camacho** (27,28), recientemente han estado trabajando con las puzolanas naturales, caracterizándolas y evaluando su reactividad conforme a los métodos estandarizados. **J. I. Escalante** del CINVESTAV de Saltillo, realizó experimentación de la actividad puzolánica del polvo de residuo de la generación de energía eléctrica del campo geotérmico, de Cerro Prieto, en Baja California (29).

Franco Massazza destaca (15) que la heterogeneidad de la familia de las puzolanas así como el fenómeno complejo que ocurre durante la hidratación, **no permite definir un modelo de actividad puzolánica**, únicamente permite tener una tendencia general para ser evaluada.

**Micheline Regourd** concluyó en uno de sus trabajos de investigación (30), que los ensayos químicos acelerados **no siempre predicen** la resistencia de morteros y concretos de cemento puzolánicos, porque la reacción de la puzolana con la cal, es solamente la primera parte del proceso puzolánico. La segunda parte, es la formación de hidratos adherentes. Cabe mencionar que la misma autora realizó un documento sobre los cementos mezclados para el nuevo milenio (31), y destaca que la tendencia es estudiar estos materiales para ahorrar energía y proteger a la naturaleza.

**Adam Neville** menciona que la puzolanicidad esta aún **imperfectamente entendida**, se sabe que el área superficial y su composición química juegan un papel importante porque ellas están interrelacionadas y el problema es complejo (32).

---

No podemos dejar de mencionar a **Uchikawa, Takemoto, Sersale, Costa, Metha, Cabrera, Collepari, Regourd, Malhotra**, etc., quienes han trabajado dentro de estas líneas de investigación, algunos de ellos se han mencionando como referencias en el presente trabajo.

## **2.2.2 Trabajos Específicos**

A continuación se presentan los autores y una breve descripción de su trabajo experimental enfocado a tratar de obtener un método para correlacionar la actividad puzolánica con las propiedades físico-químicas de las puzolanas.

- Un **Modelo Logarítmico** propuesto por **Kostogloudis** sirve para predecir el desarrollo de resistencia de cementos puzolánicos (33), fue llevado a cabo utilizando sólo la puzolana de Santorin y 17 cementos, los autores consideran como variables dependientes la resistencia a la compresión de uno y dos días, la cal libre del clinker, la resistencia a la compresión después de un tratamiento hidrotermal en autoclave por tres horas a 214° C y 21 kgf/cm<sup>2</sup>, el residuo insoluble del cemento y la relación de alita/belita del clinker.
- **Nicola Fratini**, desarrollo un método en el cual medía la alcalinidad total y la concentración de los iones Ca<sup>++</sup> en líquidos en contacto con la pasta reaccionante de ceniza volante con Ca(OH)<sub>2</sub> (34).
- **Guillaume** (método de residuo insoluble) realizó estudios a la ceniza volante y a mezclas de ceniza volante con cemento portland calcinando en ambos casos a 1000° C. Él consideró que la variación en el **residuo insoluble** del material después del tratamiento térmico, es un indicador de las propiedades puzolánicas de la ceniza volante (35).

- 
- **Steepe** fabricó especímenes de 30x30x5 mm de pastas puzolana-cal-agua sobre platos de vidrio. Después de tres días de curado bajo vapor de agua a temperatura de laboratorio sin la presencia de CO<sub>2</sub> los calentaba sumergidos en agua. Si los especímenes no eran destruidos después de este tratamiento, el material ensayado era considerado puzolánico. Tratamientos subsecuentes con HCl y NaOH indican el **residuo insoluble**. El material es aceptado como puzolánico si su contenido de SiO<sub>2</sub> reactivo es al menos 10% (36).

- **Jambor**, estudió la actividad puzolánica y realizó un estudio de las variaciones en el desarrollo del calor de disolución del material mientras está disolviéndose en una mezcla de HNO<sub>3</sub> y HF. El **residuo insoluble**

obtenido de esta manera representa aproximadamente el porcentaje del material no reactivo en la puzolana (37).

- **Leonard** investigó la velocidad de la reacción de la cal con la ceniza volante utilizando un equipo para medir la electroconductividad. Con los valores obtenidos en su equipo pudo deducir por medio de ensayos no destructivos la resistencia a la compresión (38).
- **Hubbard** ha propuesto un método considerando la relación del componente amorfo de la ceniza volante y un índice de composición (basado en el contenido de alúmina y potasa). De acuerdo con el autor, toda la alúmina presente en la composición de la ceniza volante se derivada de las impurezas del carbón (impureza de arcilla), mientras que el contenido de potasa es esencialmente una función del contenido de illita (tipo de arcilla) (39).
- **Ohsawa y Li** asumen que la mayoría de la puzolana sin reaccionar es insoluble en ácido. En una pasta de cemento y puzolana, gran parte de la puzolana reacciona con el hidróxido de calcio para formar productos de hidratación solubles en ácido. Por lo tanto es posible disolver los productos de hidratación, y el cemento sin reaccionar, dejando a la puzolana sin reaccionar como residuo insoluble. El grado de la reacción puzolánica se define como el porcentaje de puzolana consumida relativa a la cantidad inicial de puzolana en la pasta de cemento (40,41).
- **Tashiro** propuso un método para evaluar la actividad puzolánica midiendo la resistencia eléctrica de la pasta de cemento conteniendo puzolana. El experimento fue llevado a cabo bajo un curado de vapor a 70° C y se requirió únicamente 72 horas para el ensaye (42).

- **Sharma** propuso un método semi - teórico en el cual considera una correlación empírica entre las propiedades puzolánicas de la ceniza volante como la resistencia a la compresión de morteros y la fineza y la sílice soluble de la ceniza volante (43).
- **Raask y Bhaskar** aplicaron técnicas de conductividad como métodos indirectos para evaluar la reactividad puzolánica de cenizas volantes. En este método la conductividad eléctrica de una suspensión de la puzolana en 0.1 M de ácido fluorhídrico fue monitoreada. El incremento de la conductividad eléctrica fue correlacionada a la solubilidad de la sílice. Este método requiere 10 minutos de monitoreo para obtener la tasa de disolución como un índice puzolánico, el cual puede ser usado para uso en mezclas de concreto (44,45).
- **Luxan's** propuso un método que es clasificado como rápido y brillante, basado en la conductividad eléctrica, realizando mediciones en una suspensión acuosa para evaluar la actividad puzolánica de **puzolanas naturales**. Luxan's midió la conductividad de materiales puzolánicos naturales en diferentes medios acuosos (con  $\text{Ca(OH)}_2$  ó con 0.5% de NaOH) y propuso un rango en los cambios de conductividad para definir a los materiales como no puzolánicos, con moderada puzolanicidad y buena puzolanicidad (46). **Como parte de nuestro trabajo experimental estamos retomando este método para evaluar y clasificar en base a esta propuesta los materiales en estudio.**

### 2.2.3 Aspectos de Normatividad

En cuanto al **marco normativo** tanto para las puzolanas como para los cementos puzolánicos producidos debemos de considerar lo siguiente:

- La norma ASTM C 595-98 (47) contiene la especificación estándar para los cementos **hidráulicos mezclados**, para el caso de nuestra investigación los cementos mezclados se consideran como Tipo IP definido como cemento portland puzolana. En esta especificación se contemplan los requerimientos físico – químicos que se deben de cumplir y mencionan los métodos requeridos para obtenerlos.
- La norma ASTM C 618-98 (48) sirve como especificación para reconocer a las puzolanas naturales tipo N, que pueden ser utilizadas en la **producción de concretos**, y contempla los requerimientos químicos y físicos que deben de cumplirse. En la norma ASTM C 311-93 (49) se menciona el método para determinar el **índice de actividad a la resistencia** tanto con cemento portland como con cal.
- En la nueva norma Mexicana **NMX-C-414-ONNCCE-1999** (50) se incluyen los cementos mezclados y dentro de ellos al CPP (cemento portland puzolánico), el cual puede contener las puzolanas naturales, sin embargo, para este tipo de cemento, la puzolana puede ser una **combinación** de naturales y artificiales. En la misma norma se contemplan los requerimientos mecánicos y físicos así como el índice de actividad a los 28 días con el CPO 30.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 3.0 Justificación del Proyecto

El mercado actual está demandando la producción de materiales de construcción generados con consumos cada vez menores de energía y menores emisiones de gases de efecto invernadero a nuestra atmósfera. El desarrollo del conocimiento de los materiales puzolánicos naturales cada vez toma mayor importancia, no solo por su factibilidad económica y ventajas en su uso, sino también por la generación de procesos sustentables.

Actualmente y conforme a la especificación ASTM C 595-98, la decisión sobre la aceptación de un material con potencial puzolánico para su uso en la producción de cemento puzolánico tarda un poco más de 30 días. Este retardo es debido principalmente al periodo para obtener la resistencia mecánica a la compresión medida a los 28 días de hidratación de mezclas entre la puzolana natural y el cemento portland. Este periodo de tiempo es relativamente alto para decidir el uso de la fuente de la materia prima por la industria cementera. Una **evaluación a corto plazo** es conveniente. Ésta evaluación debe proporcionar una **selectividad** inicial para correlacionar las propiedades de los materiales con su reactividad y por consiguiente enfocar la experimentación a aquellos bancos que requieran una atención especial, sobre todo pensando en un beneficio económico a la empresa cementera ya que con esto la decisión se tomará en un periodo más corto y la explotación del banco comenzará con anticipación.

## 4.0 Objetivos y Metas

El objetivo principal del presente trabajo es **“Proponer un Método Analítico para Evaluar Materiales Naturales con Potencial Pozolánico de una Manera Rápida y Confiable”**, por lo cual es necesario utilizar una diversidad de materiales de origen natural, con diferencias importantes, tanto mineralógicas como estructurales que permitan selectividad en base a sus propiedades físico-químicas. En cuanto a su optimización, se evaluarán combinando diferentes concentraciones de las puzolanas con diferentes cementos portland.

Las metas son las siguientes:

- Selección de los materiales a estudiar en base a su génesis geológica.
- Caracterización físico-química de los materiales con posibilidad de potencial puzolánico.
- Correlación entre las fases minerales y el desarrollo de resistencia mecánica a la compresión de mezclas de cemento y puzolana.
- Estudio del porcentaje óptimo de estos materiales en la mezcla con el clinker para producir cemento puzolánico.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 5.0 Desarrollo Experimental

En la figura 7 se muestra en forma esquemática el desarrollo experimental de este trabajo, involucrando a los materiales, su preparación, caracterización y las mezclas propuestas, mas adelante se describen cada una de las pruebas.

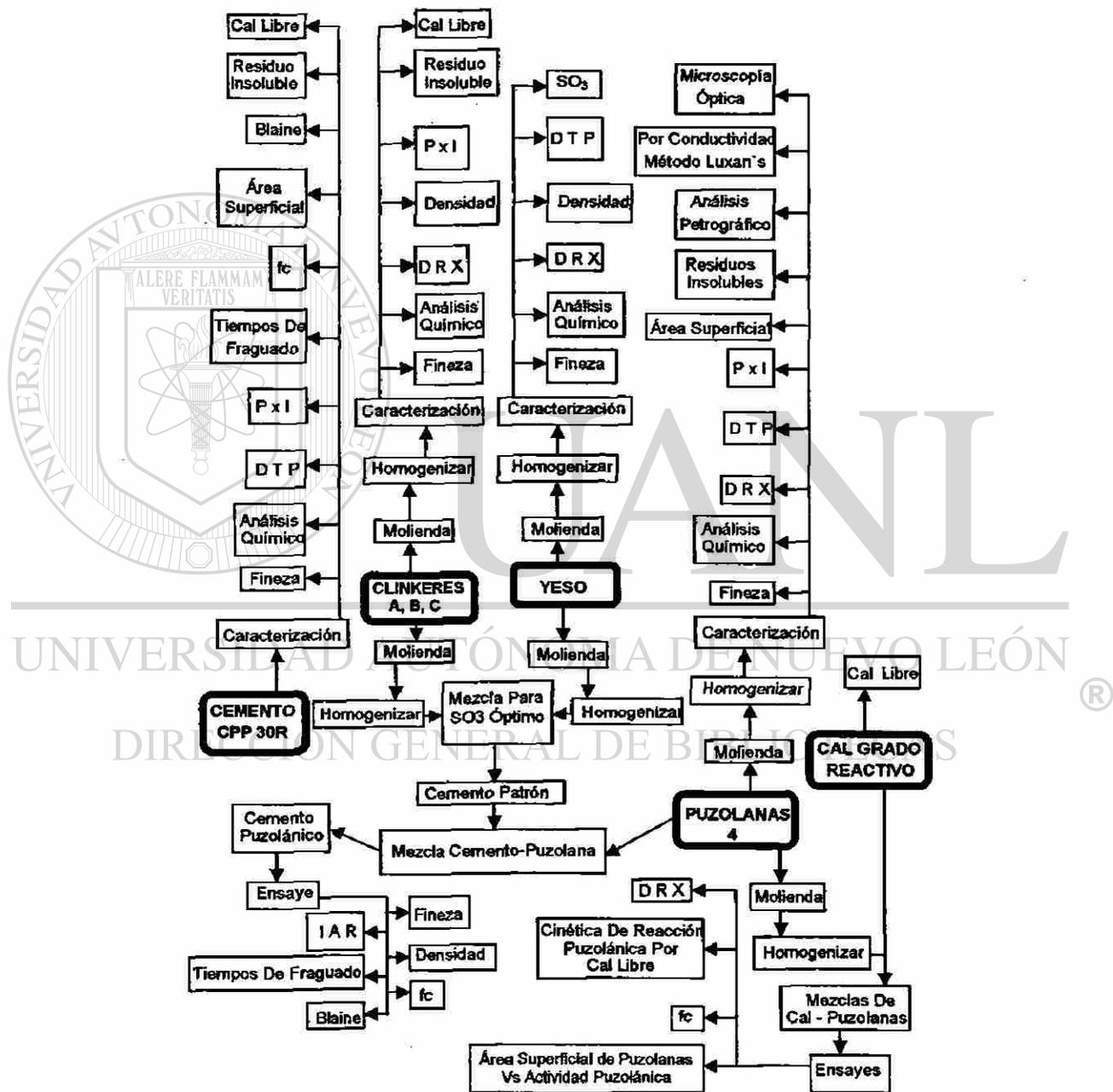


Fig. 7. Representación esquemática del desarrollo experimental

## 5.1 Definición de Materiales

Las **puzolanas naturales** que se utilizaron en el presente trabajo provienen de una búsqueda geológica nacional e internacional del personal capacitado de CEMEX y serán denominados **PT, PDB, PHCP y PHCA**.

Consideramos tres **clinker** para realizar la experimentación a los cuales denominaremos clinker **A, B y C**, cada uno proviniendo de plantas diferentes de CEMEX.

El yeso utilizado para la producción de los cementos es de origen natural y simplemente se denominará como **yeso**.

Utilizamos como referencia un **Cemento Portland Puzolánico** producido en una planta de CEMEX y será denominado **CPP 30R**, el cual servirá para comparar sus propiedades con las mezclas experimentales realizadas en el laboratorio.

Para las mezclas entre las puzolanas naturales y la cal, utilizamos **cal grado reactivo** de marca comercial Fisher con pureza superior a 95%.

Por ser un proyecto de investigación conjunto con la empresa CEMEX, y por que los bancos de los diferentes materiales están bajo estudio, se llegó al acuerdo de mantener la **confidencialidad** en cuanto a la procedencia de cada uno de ellos.

## 5.2 Preparación de Los Materiales

Los materiales fueron recibidos en el Laboratorio del **Centro de Investigación de Materiales (CIM)** de CEMEX e inmediatamente se registraron y etiquetaron, para tener un control adecuado de los mismos.

En el caso de los materiales puzolánicos se seleccionó una fineza inicial entre 90 y 94%, que pasara la malla # 325 ( $45 \mu\text{m}$ ) como parámetro inicial. Los materiales fueron secados a  $110^\circ \text{C}$  por 24 horas, triturados, pulverizados y molidos en fracciones individuales de 6 kg. La fineza se determinó utilizando el método descrito en la norma ASTM C 430-96 (51). Disponiendo de las moliendas individuales se procedió a realizar una homogenización y posteriormente se realizaron cuarteos para llegar a obtener la muestra representativa para posteriores análisis de caracterización (**imágenes 1, 2, 3, 4 y 5**).

Los diferentes clinkerres fueron triturados, pulverizados, molidos a la misma fineza seleccionada como parámetro inicial y homogenizados.

El yeso utilizado fue el resultado de un compuesto de las zonas de mayor pureza de un banco natural, esta característica se buscó para no influir en la relación A/CM debido a las impurezas del yeso. Este material fue pulverizado y molido hasta lograr que más del 90% pasará la malla # 325 ( $45 \mu\text{m}$ ).

## 5.3 Caracterización de Materiales

Para caracterizar a los diferentes materiales en estudio se consideraron las siguientes pruebas:

Clinkeres:

- Análisis químico
- Análisis mineralógico
- Distribución de tamaño de partículas (DTP)
- Contenido de cal libre
- Pérdida por ignición (P x I)
- Residuo insoluble
- Densidad

Puzolanas:

- Análisis químico
- Análisis mineralógico
- Análisis petrográfico
- Distribución de tamaño de partículas
- Observación de su morfología
- Área superficial
- Pérdida por ignición
- Residuo insoluble
- Densidad
- Puzolanidad por el método de Luxan's

Yeso:

- Análisis químico
- Distribución de tamaño de partículas

Cal grado reactivo:

- Cal libre.

El análisis químico cualitativo y cuantitativo de estos materiales, se realizó utilizando pastillas de vidrio y **equipo de fluorescencia de rayos x marca Bruker AXS (imagen 6)**. Para fabricar las pastillas de vidrio se utiliza el material previamente calcinado y se mezcla en una proporción adecuada con un fundente (Borato de litio), finalmente la mezcla se funde y enfría en una perlificadora (**imagen 7**).

La **pérdida por ignición** y el contenido de **residuo insoluble** se determinaron siguiendo el método descrito en la norma ASTM C 114-99 (52).

Las diferentes fases minerales de los materiales se determinaron utilizando la técnica de **difracción de rayos x (DRX) en polvos y equipo Siemens 5000 (imagen 8)**, el generador se fijó en 35 kV y 25 mA y la longitud de onda de la radiación estándar  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda$ ) fue 1.5418 Å. La velocidad de ejecución de la prueba fue de  $0.025^\circ 2\theta$  por segundo y la rotación del goniómetro se fijó en 30 R. P. M. Teniendo el espectro respectivo de cada material se realizó la búsqueda comparativa con los estándares de las diferentes fases minerales utilizando la base de datos de ICDD (International Centre for Diffraction Data). La estimación de la fase vítrea se realizó cuantificando el área no cristalina del espectro de difracción de rayos x de cada uno de los materiales en estudio, para realizar esto se usaron dos programas computacionales, uno para transformar los datos de salida del equipo de difracción (Powder Cell ver. 2.3) y otro con capacidad de calcular las áreas bajo las curvas (origen 6.0) (53).

En el caso de los cementos, se utilizaron las **ecuaciones de Bogue** descritas en ASTM C 150-98 (54) para estimar los compuestos potenciales.

Se utilizó la **microscopía óptica (imagen 9)** y secciones delgadas para realizar el análisis petrográfico de los materiales puzolánicos. En el caso de la puzolana PDB se realizó la sección delgada puliendo directamente el material, en el resto de las puzolanas fue necesario hacer un montaje en resina. Con la ayuda de esta técnica y la DRX se estimó el porcentaje de fase vítrea de la matriz.

Se determinó la distribución del tamaño de las partículas para todos los materiales utilizando el **equipo Malvern modelo Mastersize 2000** y como **dispersante metanol**.

Las áreas superficiales específicas de las puzolanas se obtuvieron utilizando el equipo de **Adsorción de Nitrógeno** marca **Quantachrome, modelo Autosorb**, la prueba se llevó a cabo haciendo vacío por un promedio de 20 horas a 100 ° C y utilizando el método del análisis BET sobre las isotermas de adsorción y desadsorción (**imagen 10**).

Para determinar la cal libre seguimos el método de prueba alternativo A (**Franke Modificado**) descrito en la norma ASTM C 114-99 (**imagen 11**). Esta prueba consiste en la extracción química del hidróxido de calcio, para ello se utiliza el material en estudio finamente dividido y como solvente una solución de etilo-acetoacetato en alcohol isobutilico, la solución se lleva a ebullición, se enfría y se titula con una solución de ácido perclórico.

Las observaciones morfológicas se realizaron tanto a los materiales en greña como a los materiales molidos utilizando **microscopios electrónicos de barrido, marca LEICA S 440 y ZEISS DM 960**. Los materiales se prepararon utilizando grafito como recubrimiento (**imagen 12**).

Las pruebas de **densidades** son requeridas en el diseño de las mezclas para la evaluación puzolánica con cal y es un dato necesario para la

determinación del área superficial Blaine. Las densidades fueron determinadas utilizando el frasco de LeChatelier con keroseno y siguiendo el método descrito en la norma ASTM C 188-95 (55).

Para determinar la pureza del compuesto de yeso se determinó el **contenido de SO<sub>3</sub>** (trióxido de azufre). El método estándar para obtenerlo se describe en la norma ASTM C 114-99, inciso 15.1. El valor obtenido del SO<sub>3</sub> del yeso junto con el contenido de SO<sub>3</sub> del clinker es necesario para el diseño de los cementos patrón que se obtienen al combinarlos óptimamente.

En cuanto al **hidróxido de calcio grado reactivo** se realizó la prueba de **cal libre** por el método Franke para confirmar su pureza, la cual fue aceptable, ya que su contenido de Ca(OH)<sub>2</sub> fue mayor al límite inferior de 95%, indicado por el método estándar descrito en la norma ASTM C 311-93 inciso 4.2. Cabe mencionar que este reactivo se mantuvo herméticamente cerrado para evitar su carbonatación.

Como parte de la evaluación puzolánica, realizamos **mediciones de conductividad eléctrica** en soluciones acuosas de las diferentes puzolanas con hidróxido de sodio, lo anterior conforme al método desarrollado por Luxan's, el cual fue mencionado anteriormente en la revisión bibliografía. En éste método se realiza una medición de conductividad después de agitar 200 mL una solución de 0.5% de NaOH durante 120 segundos y a 40 °C. Similarmente se realiza otra medición a la misma solución agregando 5 g de la puzolana natural y agitando 120 s a la misma temperatura. La diferencia de conductividades es un índice de actividad puzolánica. Luxan's propuso límites para definir a los materiales con buena puzolanidad, materiales con puzolanidad variable y materiales no puzolánicos, la clasificación de nuestras puzolanas se menciona más adelante.

Para realizar las mediciones de conductividades, utilizamos un equipo marca ThermoOrion modelo 105 A plus.

## 5.4 Mezclado de Materiales

### 5.4.1 Determinación del Yeso Óptimo en Cementos patrón

Para determinar los **cementos que servirían como patrón** se realizaron mezclas de los diferentes clinker con diferentes dosificaciones de yeso, excepto para el clinker A. La finalidad de estas mezclas es obtener la combinación entre éstos que resultara con la **máxima resistencia mecánica a la compresión (fc) de morteros a las 24 horas**. Para el caso del cemento patrón A, la empresa CEMEX dispone de la información de su laboratorio de la planta y se nos proporcionó el % de  $SO_3$  óptimo para producir este cemento. En los casos de los cementos B y C se realizaron mezclas variando la dosificación del yeso. El contenido de yeso óptimo se expresó en función de  $SO_3$ , cabe mencionar que se considera dentro de esta cantidad la aportación del  $SO_3$  contenido en el clinker.

Las proporciones de clinker y yeso que se utilizaron en cada una de las mezclas se tamizaron por la malla # 50 para lograr una mejor distribución del material. Los pequeños grumos formados se rompieron y todo el material pasó esta malla, posteriormente se homogenizaron en bolsa de polietileno.

El diseño, fabricación y curado de los morteros se realizaron conforme a la norma ASTM C 109-98 (56). Se consideró una relación Agua/Cemento (A/C) de 0.485 y arena estándar conforme a la norma ASTM C 778 (57), el procedimiento de mezclado fue el descrito en la norma ASTM C 305 (58). Los moldes conteniendo los cubos de mortero se curaron a  $23^\circ \pm 1.7^\circ C$  por 24 horas y se ensayaron a la compresión a las  $24 \pm \frac{1}{2}$  horas.

Los cementos patrones obtenidos se utilizaron para realizar las mezclas con diferentes porcentajes de las puzolanas.

## 5.4.2 Optimización de Cementos Patrón y Puzolanas

En base a la cantidad máxima de Portlandita que puede ser liberada de la reacción de hidratación entre el cemento portland y el agua según la referencia 14, se decidió realizar **mezclas sustituyendo un 20, 25 y 30%** de los cementos patrón por puzolana para comparar las reactividades con los cementos patrón. Para el caso del cemento con clinker A se realizaron las combinaciones con las **cuatro puzolanas**, mientras que para el clinker B y C, solo se diseñaron mezclas con la puzolana PDB.

Los morteros se fabricaron siguiendo el método ASTM C 109-98 (**imagen 13**), la cantidad de agua adicionada fue la requerida para lograr una fluidez de 105 a 115 % (**imagen 14**). Los moldes conteniendo los morteros se curaron a  $23^{\circ} \pm 1.7^{\circ} \text{ C}$  y a una humedad relativa mayor al 95% por 24 horas (**imagen 15**), posteriormente se desmoldaron y curaron, sumergiéndolos en pila con agua saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$  a  $23^{\circ} \pm 1.7^{\circ} \text{ C}$  (**imagen 16**) y se ensayaron a la compresión a las edades de 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días.

Con los resultados de la resistencia mecánica a la compresión a diferentes edades de los morteros producidos, se concluye sobre la cantidad de puzolana que puede reemplazar al cemento patrón en las combinaciones anteriormente citadas.

Cabe mencionar que la norma ASTM C 311-93, especifica los métodos para determinar los índices de actividad a la resistencia de las puzolanas tanto con cemento portland como con cal. La combinación con cemento portland será evaluada con las mezclas de puzolanas y cementos patrón descritas en este capítulo.

## 5.5 Caracterización de Los Cementos Producidos

La caracterización de los cementos producidos tanto patrón como para aquellos a los que se les incluyó puzolana es la siguiente:

- Determinación de la **finura**, utilizando la malla 45  $\mu\text{m}$  (#325) y por vía húmeda de acuerdo con la norma ASTM C 430-96.
  - Determinación del **área superficial** específica utilizando equipo de permeabilidad al aire "**Blaine**". Este método se describe en la norma ASTM C 204-96 (59). **(imagen 17)**.
  - Determinación de la **densidad** conforme a la norma ASTM C 188-95.
  - Fabricación de pastas para determinar la **consistencia normal** y con esta cantidad de agua poder realizar el **tiempo de fraguado** (60).
  - Obtención del **tiempo de fraguado**, utilizando las agujas de Vicat y conforme al método estándar descrito en la norma ASTM C 191-99 (61).
  - Fabricación de morteros de prueba para encontrar la **fluidez de 105-115%** conforme a los requerimientos del método de prueba descrito en la norma ASTM C 109-99.
- 
- Fabricación de cubos de mortero para determinar la cinética de reacción mediante la **resistencia mecánica a la compresión** a las edades de 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días de edad, los cubos fueron curados de forma estándar conforme a ASTM C 109.

## 5.6 Caracterización del Cemento Producido en Planta

Con el objetivo de comparar los cementos producidos en el laboratorio, con el cemento obtenido en un molino industrial, solicitamos un cemento puzolánico CPP 30R producido en una de las plantas de CEMEX.

La caracterización de este cemento de acuerdo con las normas ASTM, incluyó lo siguiente:

- Análisis químico
- Pérdida por ignición
- Residuo insoluble
- Distribución de tamaño de partículas utilizando equipo Malvern, Mastersize 2000.
- Determinación de la finura, utilizando la malla 45  $\mu\text{m}$  (#325) y por vía húmeda.
- Determinación del área superficial específica por medio del equipo de permeabilidad al aire Blaine y por medio de la técnica de adsorción de nitrógeno, utilizando equipo Quantachrome.
- Determinación de la densidad.
- Determinar la consistencia normal.
- Obtención del tiempo de fraguado, utilizando el método de la aguja de Vicat.
- Determinación de la cantidad de agua para una fluidez de 105-115%.
- Fabricación de cubos de mortero para determinar la cinética de reacción mediante la resistencia mecánica a la compresión a las edades de 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días de edad, los cubos fueron curados de forma estándar conforme a la norma ASTM C 109.

## 5.7 Pruebas de Puzolanicidad con Cal

Para la evaluación de la reactividad puzolánica con cal utilizamos la resistencia mecánica a la compresión conforme al método descrito en la norma ASTM C 311-93. Se produjeron morteros (hidróxido de calcio-puzolana-arena de sílice -agua) con una fluidez de  $110 \pm 5\%$  de acuerdo con la norma ASTM C 109-99. Cabe mencionar que los moldes conteniendo el mortero fueron herméticamente sellados y recibieron un curado estándar por  $24 \pm 2$  horas y después fueron almacenados en un ambiente de  $55 \pm 1.7$  °C (imagen 18) hasta completar 7 días, posteriormente se dejaron enfriar por  $4 \pm \frac{1}{4}$  horas a  $23 \pm 1.7$  °C, y se procedió a su ensaye a la compresión.

Para evaluar la cinética de la reactividad puzolánica en la pasta preparamos éstas con la misma cantidad de agua utilizada para producir los morteros y determinamos el contenido de cal libre siguiendo el método de prueba alternativo A (Franke Modificado) citado anteriormente.

Las pastas fueron colocadas en doble bolsa de polietileno y curadas igualmente que los morteros utilizados para obtener la resistencia mecánica a la compresión.

La velocidad de hidratación se determinó a las edades de 1, 3, 7, 14 y 21 días. A estas edades las pastas se retiraban del curado, se molían y se sobresaturaban con acetona para detener la hidratación. Después de una agitación manual las pastas se filtraron utilizando filtro wathman # 41, por último se secaron a 100 °C por 30 minutos y se determinó la cal libre por el método Franke.

## 6. Análisis y Comentarios de los Resultados

### 6.1 Caracterización

En la **tabla 1**, se presentan los resultados de las finezas y densidades de cada uno de los materiales que intervienen en la experimentación. Como podemos observar, en cuanto al **CPP 30R** producido en un molino de planta cementera, **presentó una fineza (pasa la malla #325) de 96.7%**, que es una fineza superior al parámetro inicial que nos fijamos de 94.0%, lo cual debe ser considerado en las conclusiones comparativas con el resto de los cementos puzolánicos producidos en el laboratorio. Los valores de las densidades son utilizados para el cálculo de las proporciones de las mezclas y necesarios en la prueba de área superficial por permeabilidad al aire (Blaine).

Las **gráficas 1 y 2** muestran la distribución del tamaño de las partículas de los materiales en estudio. Las distribuciones granulométricas de los materiales cementantes y puzolánicos son muy similares, por lo cual este concepto no es determinante en las comparaciones posteriores que realizaremos con estos materiales. En la **tabla 2** se muestran los valores medios de los diámetros de partículas de los diferentes materiales, el rango de tamaños oscila entre los 10.3 y los 15.1  $\mu\text{m}$ .

La composición química cualitativa y cuantitativa de los materiales y el CPP 30R se presenta en la **tabla 3** así como los residuos insolubles, las pérdidas por ignición y el contenido de álcalis como  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalentes. Se puede observar que la suma de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en las puzolanas **supera el 70%** que establece la norma ASTM C 618-89 como mínimo para las puzolanas Clase N que se evalúan para usarse en concreto, cabe mencionar que **la norma ASTM no especifica la estructura, ni la morfología** que deban de tener los compuestos, por consiguiente no se debe considerar dicho límite como valor concluyente de reactividad de los materiales puzolánicos. Las puzolanas

muestran un carácter ácido ( $\text{SiO}_2 > 65\%$ ), excepto la puzolana PT la cual presenta un carácter intermedio ( $55\% < \text{SiO}_2 < 65\%$ ) (62). En los clinkerres podemos observar su **contenido de  $\text{SO}_3$** , el cual es considerado para el diseño de las mezclas para la obtención de los cementos patrón. Los **residuos insolubles** de las puzolanas se manifiestan congruentemente con su actividad puzolánica como se verá más adelante. Los cementos patrón **A y B resultan altos en álcalis mientras que el cemento patrón C resulta bajo en álcalis**, lo anterior es importante ya que tanto los álcalis como el  $\text{SO}_3$  en solución influyen en la reacción puzolánica (63,64, 65).

Las áreas superficiales obtenidas por adsorción de nitrógeno de las diferentes puzolanas utilizadas así como la del cemento CPP 30R, se presentan en la **tabla 4**. La Puzolana PT presentó la mayor área superficial con  $63.13 \text{ m}^2/\text{g}$ , mientras que la puzolana PHCP presentó la menor área con  $4.61 \text{ m}^2/\text{g}$ , lo que representa que la puzolana PT tiene 13.7 veces más área superficial que la PHCP.

Calculamos el total de porosidad cuantificando los volúmenes de nitrógeno gas penetrado en los poros de los materiales, la puzolana PT tiene una porosidad total de 25.9 %, nueve veces más que la puzolana PHCP que tiene 2.8 %, éstos parámetros morfológicos son de suma importancia en la actividad puzolánica de los materiales y en los requerimientos de agua para dar la misma fluidez.

La **gráfica 3** muestra los espectros del análisis de difracción de rayos x de las cuatro puzolanas, en ellos se observa una banda difusa entre  $20$  y  $40^\circ 2\theta$  debido a la presencia de vidrios de aluminosilicatos. En la **tabla 5** se encuentran las fases mineralógicas de las puzolanas, además se incluye la determinación del porcentaje de la matriz vítrea. En la **tabla 6** se muestra la **clasificación petrográfica** de las puzolanas evaluadas.

Todas las puzolanas son clasificadas como **ignimbritas** por tener origen ígneo. Utilizando la composición química de las puzolanas las podemos clasificar geológicamente. Se conoce, que las tobas riolíticas y dacíticas tienen **buena puzolanicidad** a diferencia de las andesitas y los basaltos que desarrollan menor puzolanicidad (4), sin embargo hemos encontrado que la puzolana PT a pesar de ser clasificada como andesita ha desarrollado muy buena reactividad (ver tabla 22), por lo tanto es muy importante considerar además de su composición química su mineralogía y morfología.

Las puzolanas en estudio provienen de origen **piroclástico**, conteniendo principalmente feldespatos alcalinos, cuarzo, cristobalita, lo anterior contenido en una matriz vítrea. En el caso de la puzolana PDB presenta una **textura fluidal**, podemos apreciar la fase calcita (la cual no es de origen piroclástico), es probable que esta se encuentre como producto de las sedimentaciones producidas por la lixiviación de aguas en los estratos de estos bancos de materiales.

Las fases cristalinas no poseen actividad puzolánica (66), sin embargo aquellas que se encuentran desordenadas o se encuentran en un estado metaestable, presentan algo de actividad puzolánica como el caso de la cristobalita presente en la puzolana PHCA, la cual debe su actividad potencial a la cristobalita y a la pequeña cantidad de fase vítrea. Sin embargo su reactividad depende adicionalmente de la cantidad de iones en disolución que se encuentran en su red atómica ya que estos iones generan una estabilidad estructural del material (67,68).

En las **imágenes de la 19 a la 29** se presentan los resultados de la exploración morfológica de los materiales puzolánicos. Para cada una de ellas se presenta una imagen general del material en greña como llegó al laboratorio,

dos imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido, una seleccionada del material en greña y otra obtenida del material molido.

En la **imagen 19** podemos observar la puzolana PT en greña, se presenta como un material deleznable, con una estructura porosa y un color café oscuro. En la **imagen 20** se presenta la misma puzolana en greña y molida, la cual podemos clasificar como un conglomerado heterogéneo poroso presentando fallas concoidales debido al vidrio de alta relación sílice/alúmina. En la **imagen 21** se presenta la imagen de una partícula molida en el molino de bolas de acero, el material presentado es una toba volcánica conteniendo materiales cristalinos en una matriz amorfa.

En las **imágenes 22, 23 y 24**, se muestra la puzolana PDB, la cual se presenta en la forma como fue extraída al utilizar broca de 37 mm de diámetro, como se mencionó anteriormente este material presenta una textura fluidal y una sinterización parcial que lo hace menos deleznable que el resto de los materiales puzolánicos en estudio, lo anterior permitió obtener de esta forma la muestra estratigráfica. La imagen de esta puzolana en greña se presenta en la **imagen 23**, la cual podemos definir como un conglomerado masivo compacto no poroso, en ella se presentan fallas concoidales típicas de los vidrios. En la parte central de la imagen se presenta material de un tono oscuro el cual fue identificado como  $\text{CaCO}_3$ . En la **imagen 24**, podemos observar la misma puzolana pero ahora molida en molino de bolas de acero, en la cual se aprecia una partícula conteniendo una mezcla de materiales tanto cristalinos como vítreos, las partículas se presenta en forma angular, y debido a esto puede requerirse mayor cantidad de agua para dar la misma trabajabilidad si la comparamos con una partícula esférica.

La puzolana PHCP se presenta en las **imágenes 25, 26 y 27**. Este material es muy suave y presenta conglomerados y piezas individuales de pumicita. La **imagen 26**, presenta una partícula vítrea pumicítica porosa, la cual

se produce al enfriar bruscamente el magma volcánico. Este tipo de material presenta buena reactividad puzolánica. En la **imagen 27** se presenta una partícula de la puzolana PHCP y representa un conglomerado de minerales silicoaluminosos en una matriz vítrea.

En las **imágenes 28 y 29** se presenta la puzolana PHCA, la cual está constituida por un conglomerado masivo poroso de minerales, entre los cuales se destaca la cristobalita, que presenta actividad puzolánica como se comprobará más adelante. Esta puzolana está constituida por el menor contenido de fase vítrea en relación al resto de los materiales puzolánicos en estudio.

## 6.2 Pruebas para Determinar $SO_3$ Óptimo

En las **tablas 7 y 8** se muestran las diferentes **proporciones** utilizadas de **clinker y yeso** para definir los cementos patrón B y C. Con cada una de estas proporciones se fabricaron morteros para determinar la resistencia mecánica a la compresión a las 24 horas y con estos valores poder graficar y determinar los consumos óptimos de  $SO_3$ . En las **gráficas 4 y 5** se muestran las curvas del comportamiento de la resistencia mecánica a la compresión, en base a estos resultados se ha considerado que la **cantidad de  $SO_3$  en el cemento patrón B será 3.4%**, mientras que para el cemento **patrón C será de 3.8 %**. Como se mencionó anteriormente, el laboratorio de la empresa CEMEX nos proporcionó el valor de  $SO_3$  óptimo para el clinker A y con este se formuló el cemento **patrón A**, el valor considerado es **3.4%**. Cabe mencionar que la norma ASTM C 595 especifica que la cantidad máxima de  $SO_3$  en los cementos puzolánicos IP, no será mayor de 4.0%, cumpliendo por consiguiente todos los cementos mezclados producidos en esta investigación con este requerimiento químico. Conociendo los aportes del  $SO_3$  de los clinker y yeso de las **tablas 7 y 8**, se

concluyó que la **cantidad de yeso** para fabricar los cemento patrón **A, B y C** son **4.60, 3.70 y 5.83 %** respectivamente.

### **6.3 Compuestos Potenciales de los Cementos Patrón**

Los compuestos potenciales de los cementos patrón según Bogue se presentan en la **tabla 9**. Cabe mencionar que los álcalis y el  $\text{SO}_3$ , **aceleran** la reacción puzolánica (69,70). El cemento con mayor contenido de alita y álcalis es el cemento A con 62.99 y 1.33% respectivamente. En el caso del cemento B presenta un contenido intermedio de los compuestos potenciales obtenidos para el cemento A y C. El cemento C presenta la menor concentración de alita (52.58%), la menor concentración de álcalis (0.28%) y además esta presente la mayor concentración de belita (18.26%). Como se mencionó anteriormente en la parte introductoria, **la belita reacciona más lentamente que la alita** por consiguiente la formación de los productos de reacción como los C-S-H y la portlandita se obtienen a menor velocidad que para la alita, así mismo la producción de la portlandita es **una tercera parte** (13) que la producida por la alita, recordando que la reacción puzolánica requiere la portlandita. Otro aspecto a considerar sería el tamaño de los cristales de la alita y de la belita en los diferentes cementos, ya que estos influyen en la potencialidad reactiva de los cementos. Los comentarios anteriormente mencionados deben ser considerados para justificar los resultados de las resistencias mecánicas a la compresión obtenidos en las mezclas con las diferentes puzolanas y así mismo concluir con los resultados encontrados en las reactividades puzolánicas de las puzolanas con la cal reactiva.

### **6.4 Cementos Patrón**

Las proporciones utilizadas para producir los morteros de cementos patrón A, B, C y el CPP 30R se presentan en la **tabla 10**. Como se mencionó

anteriormente la cantidad de yeso utilizado fue de 4.6, 3.70 y 5.83 % respectivamente, para los cementos A, B y C. En la misma tabla se presentan las relaciones agua/cementante utilizadas para lograr la misma fluidez en los morteros. En los **cementos sin puzolana** podemos detectar que el cemento C requiere mayor consumo de agua, esto se puede justificar al analizar las áreas superficiales de los cementos, ya que el cemento C presenta mayor área superficial (4,682 m<sup>2</sup>/kg) que los cementos A y B (3,804 y 4,265 m<sup>2</sup>/kg), sin embargo, para el cemento CPP 30R, a pesar de tener menos área superficial que el cemento C, requiere un poco más de agua que el cemento C y esto es debido a la utilización de la puzolana, ya que generalmente se requieren más agua, para la misma fluidez en morteros que contienen puzolana.

En la **tabla 11** se presentan los resultados de las resistencias mecánicas a la compresión de los morteros fabricados con el cemento CPP 30R curados hasta los 56 días.

En la **gráfica 6** se presentan los comportamientos de la **cinética de reacción de los cementos patrón** a través de la ganancia de resistencia mecánica a la compresión. Como podemos observar, el cemento patrón C desarrolla a edades tempranas resistencias relativamente más bajas que el resto de los cementos, incluso que el cemento CPP 30R, sin embargo a partir de los 7 días tiene una ganancia importante de resistencia (554 kgf/cm<sup>2</sup>), alcanzando un incremento del 36% más que el cemento patrón A para la edad de 56 días. El cemento patrón A fue el que menor resistencia a la compresión obtuvo a esta misma edad (407 kgf/cm<sup>2</sup>). En la misma gráfica podemos observar que el cemento CPP 30R presenta una tendencia a incrementar su resistencia a edades avanzadas (después de 56 días), cabe mencionar que este cementante presentó una fineza de 96.7% (pasa la malla 45 µm) y contiene puzolana natural, sin embargo no podemos comparar sus compuestos potenciales de Bogue con el resto de los cementos patrón. Los cementos patrón A y B prácticamente

desarrollan su potencial de resistencia a los 28 días y se observa un pequeño incremento menor al 5% entre los 28 y 56 días.

## 6.5 Cementos Puzolánicos

En la **tabla 12**, se muestran las proporciones utilizadas para producir las mezclas del cemento patrón A con las puzolanas, sustituyendo el 20, 25 y 30 % del cemento patrón A por las diferentes puzolanas. En la misma tabla se muestran las áreas superficiales Blaine de los cementantes puzolánicos producidos para las combinaciones antes mencionadas. Como era de esperarse, para la misma fluidez el consumo de agua aumenta conforme aumentamos la dosificación de la puzolana en la mezcla para cada una de las puzolanas adicionadas, esto es debido al área superficial de las puzolanas y a su porosidad.

En la **tabla 13** se muestran las proporciones utilizadas en la combinación de los cementos B y C con la puzolana PDB. Al comparar las relaciones agua/cementante de los cementos puzolánicos obtenidos al combinar la puzolana PDB con los tres cementos (**tablas 12 y 13**), observamos que esta **relación aumenta** conforme se incrementa el **área superficial** de los cementos mezclados, ya que como se mencionó anteriormente el cemento C presenta la mayor área superficial, lo cual significa que se **requiere mayor cantidad de agua** para dar la fluidez especificada para los cementos puzolánicos con dicha puzolana.

Las resistencias mecánicas a la compresión de los cubos de mortero fabricados con el cemento patrón A y cada una de las cuatro puzolanas adicionadas y sus tres respectivas sustituciones y a las diversas edades se muestran en la **tabla 14** y en las **gráficas 7, 8, 9 y 10**. Al analizar los resultados vemos que el cemento patrón A cumple ampliamente con la resistencia

especificada por la norma ASTM C 150 Tipo I a los 28 días (286 kgf/cm<sup>2</sup>), y que todos los cementantes producidos cumplen con los requerimientos de la norma ASTM C 595, la cual especifica las resistencias a la compresión para cementos IP a los 3, 7 y 28 días de 133, 204 y 255 kgf/cm<sup>2</sup> respectivamente. El cementante producido con la puzolana PHCA presentó la menor resistencia relativa, recordando que es la puzolana que **menor contenido de fase vítrea** presenta y una **relativamente menor área superficial**. El producido con la puzolana PDB, presenta la mayor resistencia a la compresión a pesar de no tener la mayor área superficial, esto se podría explicar al ver las relaciones agua/cementante de las mezclas. Si comparamos las relaciones agua/cementante utilizadas en la producción de los cementantes "cemento A + PDB" y "cemento A + PT" que se muestran en la **tabla 12**, vemos que el cementante con la puzolana PT **presenta la mayor área superficial pero también la mayor relación agua/cementante**, esto es debido a la mayor cantidad de agua requerida para dar la misma fluidez. **Es difícil de establecer la verdadera cantidad de agua utilizada en la reacción, debido a que la puzolana presenta absorción y/o adsorción de agua.**

---

Las resistencias mecánicas a la compresión de los cubos de mortero fabricados con el cemento patrón B y las adiciones de la puzolana PDB, se muestra en la **tabla 15** y su comportamiento grafico se muestra en la **gráfica 11**. Tanto para el cemento patrón como para los cementos mezclados con esta puzolana se cumplen los requerimientos establecidos por la norma ASTM C 150 y 595.

Las resistencias mecánicas a la compresión de los cubos de mortero fabricados con el cemento patrón C y las adiciones de la puzolana PDB, se muestra en la **tabla 16** y su comportamiento grafico se muestra en la **gráfica 12**. Tanto para el cemento patrón como para los cementos mezclados con esta puzolana se cumplen los requerimientos establecidos por la norma ASTM C 150

y 595 hasta los 28 días, sin embargo, el cemento patrón C alcanzó a esta edad una resistencia mayor de un 24 a un 38% que los cementantes adicionados.

En las **tablas 17, 18 y 19** se presentan los índices de actividad a la resistencia de las mezclas de las puzolanas con los cemento patrón A, B y C, observamos que con una sustitución del 20% del cemento por puzolana el índice de actividad a la resistencia a los 28 días fue superior al 75%, que establece la ASTM C 595 como mínimo. **Para todas las combinaciones se cumple este requerimiento.**

Es importante mencionar que las diferentes compañías productoras de cemento establecen **su propio control de calidad**, en el caso de CEMEX estable para la aceptación de las puzolanas un índice de actividad del 90% pero además sustituyendo un 30% de la puzolana por el cemento.

Analizando los resultados encontramos que **sólo la puzolana PDB** cumple con los límites establecidos por CEMEX y solo en las mezclas con el cemento patrón A.

Los resultados encontrados en relación a las mezclas de los tres cementos patrón con la puzolana PDB, podemos mencionar que las **combinaciones con el cemento A resultan ser las de mejor índice de actividad a la resistencia**, esto es posiblemente debido a la acción de un mayor contenido de los álcalis y de  $SO_3$  en el cemento A, además de la mayor concentración de alita y la menor relación A/CM para la misma fluidez especificada.

A pesar de que la mezcla del **cemento C con la puzolana PDB arrojó la mayor resistencia mecánica a la compresión**, la puzolana PDB con este cemento **desarrolló el menor índice de actividad a la resistencia**. Cabe

mencionar que el cemento C, es el que menor cantidad de álcalis,  $SO_3$  y alita presenta y además la mayor concentración de belita.

En las mezclas con el cemento B se obtienen índices de actividad a la resistencia intermedios a los obtenidos con los cementos A y C, así mismo también encontramos que en este cementante se presentan cantidades intermedias de las concentraciones de álcalis,  $SO_3$  y de alita y belita.

En la **tabla 20** se muestran los resultados del **área superficial** de los cementantes producidos, utilizando para esto el aparato de permeabilidad al aire **Blaine** descrito en la norma ASTM C 204-96. Se ha mencionado el efecto de este parámetro en lo referente al mecanismo de hidratación de los materiales cementantes en estudio, tanto en su reactividad como en los requerimientos de agua. El valor del área superficial se manifiesta en forma creciente conforme aumentamos el contenido de la puzolana para todos los cementantes, pensamos que esto es debido al mejor acomodamiento de los superfinos de las partículas de las puzolanas en la mezcla del cementante en la prueba. El área superficial de todos los cementantes se encuentra comprendida entre 410 y 565  $m^2/kg$ .

Los fenómenos de rigidización, fraguado y endurecimiento son manifestaciones físicas de las reacciones progresivas de hidratación del cementante. Además, los tiempos de fraguado inicial y final del cementante son dos valores definidos arbitrariamente en función del método de prueba, que determinan el tiempo de solidificación de la pasta de cementante fresco. Es muy importante observar el comportamiento de este fenómeno físico para los diferentes cementantes producidos. En la **tabla 21** se presentan los resultados de la consistencia normal requerida para fabricar las pastas y determinar los tiempos de fraguado **Vicat** para los cementantes en estudio. En las **gráficas 13 y 14** se presentan los resultados en forma de barras, además se presenta el límite establecido por la norma ASTM C 150 y 595 (45 minutos de fraguado inicial Vicat).

Podemos comentar que para todos los cementos producidos se cumple con el requerimiento del fraguado inicial Vicat excepto para el caso de la **puzolana PT con el cemento patrón A**, ya que conformen aumentamos la dosificación de esta puzolana disminuye el tiempo de fraguado inicial y final, pensamos que el **efecto de la alta área superficial** relativa de esta puzolana, que al ir aumentando la dosificación de ésta en el cementante aumenta por consiguiente el área superficial de la mezcla como se aprecia en la **tabla 20** y esto provoca que cierta cantidad de agua sea adsorbida por la puzolana y otra parte sea absorbida, dejando por consiguiente una **menor** relación agua/cemento neta que se manifiesta en una más rápida solidificación de la pasta cementante, disminuyendo por consiguiente el tiempo del fraguado inicial. Además se debe de considerar el efecto acelerante de la concertación de los álcalis.

Para el cemento mezclado con puzolana PT, la dosificación del 25 y 30% *no cumplen con los requerimientos de la norma ASTM C 595-98*, ya que se obtienen tiempos de fraguado iniciales de 41 y 32 minutos respectivamente.

En el caso del cemento patrón C y las mezclas con la puzolana PDB, se encuentra que el cemento patrón C esta en el limite especificado, mientras que en las mezclas del 20, 25 y 30%, los tiempos de fraguado inicial van en aumento.

## **6.6 Pruebas de Puzolanicidad con Cal**

En la **tabla 22** se muestran las proporciones utilizadas para producir los morteros cal-puzolana, así como los resultados de la resistencia mecánica a la compresión, lo anterior siguiendo el método estándar ASTM C 311-93 inciso 28, como se describió en el inciso 5.7. Como podemos observar, a pesar de tener

aproximadamente la misma concentración las cuatro puzolanas de sílice, alúmina y óxido de hierro, el efecto de las **fases reactivas y su área superficial** es considerable en lo que respecta a la resistencia a la compresión, la especificación ASTM C 618-89 establece la resistencia a la compresión mínima a los 7 días de  $56 \text{ kgf/cm}^2$  (5500 kPa), todos los materiales en estudio sobrepasan este requisito. Sin embargo, la puzolana más reactiva fue PT, la cual presentó el mayor esfuerzo mecánico a la compresión de  $136 \text{ kgf/cm}^2$  con un área superficial específica obtenida por medio de la adsorción de nitrógeno de  $63.13 \text{ m}^2/\text{g}$ , la resistencia alcanzada por esta puzolana es mayor en un 70 y 100% de las resistencias obtenidas por las puzolanas PHCP y PHCA respectivamente ( $95$  y  $65 \text{ kgf/cm}^2$ ), las cuales tienen las más bajas áreas superficiales con  $4.6$  y  $8.8 \text{ m}^2/\text{g}$ , de aquí concluimos que con mayor área superficial se alcanzó mayor resistencia a la compresión, para la misma fluidez, en sistemas cal-puzolana.

Los resultados de las cinéticas de reacción puzolánica conociendo la cal libre, se obtuvieron de las pastas de cal-puzolana para los diferentes materiales y las diferentes edades, esto se muestra en la **tabla 23**, en la cual se incluyen las ecuaciones y sus coeficientes de correlación correspondientes a las curvas que se muestran en la **gráfica 15**. Como podemos observar en la **gráfica 15**, las tendencias corresponden a una curva potencial decreciente, si analizamos el factor de la potencia de cada una de las ecuaciones de los materiales, vemos que existe una relación directa de su reactividad con la cal, ya que al tener un factor de potencia más negativo el consumo de cal es mayor, al igual que la reactividad de la puzolana, debido a este comportamiento fue conveniente encontrar la cinética de reacción de pastas cal – puzolana que marcara la frontera en cuanto a la resistencia establecida por ASTM ( $56 \text{ kgf/cm}^2$ ). Realizamos cubos de morteros sustituyendo 5, 10 y 15 % de la puzolana PHCA, (ya que ésta fue la que desarrollo menor resistencia) por arena de sílice ASTM molida similarmente que la puzolana, realizando el mismo procedimiento de curado que los morteros cal – puzolana. Encontramos que la sustitución del 10%

arroja una resistencia mecánica a la compresión de  $50 \text{ kgf/cm}^2$ , la cual fue considerada como valor frontera. Posteriormente se fabricaron pastas cal - puzolana con las mismas proporciones que los morteros con 10% de sustitución de PHCA y se obtuvieron los valores de cal libre para las diferentes edades, lo anterior se muestra en la misma **gráfica 15**, la ecuación correspondiente que representa su comportamiento se encuentra en la **tabla 23**, con esta ecuación **podemos limitar el consumo de cal libre a cierta edad** para el estudio de nuevos bancos puzolánicos.

Como era de esperarse, la producción de los C-S-H que son los responsables de la resistencia mecánica de los morteros se lleva a mayor velocidad en la puzolana PT, que es la que presenta mayor área superficial BET, teniendo aproximadamente la misma composición química y fases reactivas que el resto de las puzolanas. Así mismo podemos apreciar que las curvas de cal libre presentan una tendencia similar, aumentando su resistencia al disminuir la cal libre. Cabe mencionar que el estudio para esta investigación se realizó hasta 21 días de curado y para esta fecha las curvas tienden a mantener entre sí el mismo comportamiento, es posible que la reacción puzolánica continúe a mucho menor velocidad y estará limitada por el contenido restante de la matriz vítrea y las fases reactivas de las puzolanas.

En las **gráficas 16, 17, 18 y 19** se muestran los espectros de DRX de las pastas molidas obtenidas de las mezclas cal-puzolana, que incluyen las diferentes puzolanas y a las diferentes edades, hasta los 21 días. Como podemos observar en todas las gráficas las intensidades de la portlandita y de la fase vítrea de las puzolanas disminuyen en el transcurso del tiempo y a la vez se están generando C-S-H amorfos y pobremente cristalinos. Cabe mencionar que para el caso de la pasta cal – PHCA, se puede apreciar que el pico más intenso de la cristobalita ubicado en  $22.2\theta$ , va disminuyendo con el tiempo, **confirmando que esta fase presenta actividad puzolánica y es la responsable junto con la matriz vítrea de la reactividad de este material.**

Las **gráficas 20, 21, 22 y 23** se realizaron para observar cualitativamente las zonas de consumo de las fases reactivas de las puzolanas por medio de los resultados de la DRX. Para esto, fue necesario comparar los espectros de DRX de las puzolanas sin reaccionar con el espectro de la pasta molida de cal – puzolana respectiva. Se decidió comparar con el espectro de 21 días de edad, ya que para esta edad podemos visualizar mejor las zonas de consumo en esta reacción puzolánica.

Predominantemente entre los ángulos 15 y los 30  $2\theta$ , se aprecia el consumo de las fases reactivas de las puzolanas. Particularmente, en la **gráfica 22** se observa que el espectro de la puzolana PHCA presenta un comportamiento más cristalino que el resto de las puzolanas, pero como ya se mencionó anteriormente su actividad puzolánica se basa en el consumo de la cristobalita.

Para todas las puzolanas se realizó la **gráfica 24**, por una parte los valores del área superficial BET de las puzolanas y por otra el porcentaje de cal libre a los 7 días; en la misma se anotan las resistencias mecánicas a la compresión de los morteros de cal – puzolana a los 7 días y el porcentaje estimado de fase reactiva. Podemos observar que existe una relación directa entre el área superficial de las puzolanas y la reactividad de los morteros de cal – puzolana, para aproximadamente el mismo contenido de fase reactiva.

## **6.7 Pruebas de Conductividad Eléctrica (Método de Luxan's)**

En la **tabla 24** se muestran los resultados de las mediciones de **conductividad iónicas** de las mezclas entre las diferentes puzolanas y una solución de 0.5% de NaOH a 40 °C, así como la clasificación general de Luxan's.

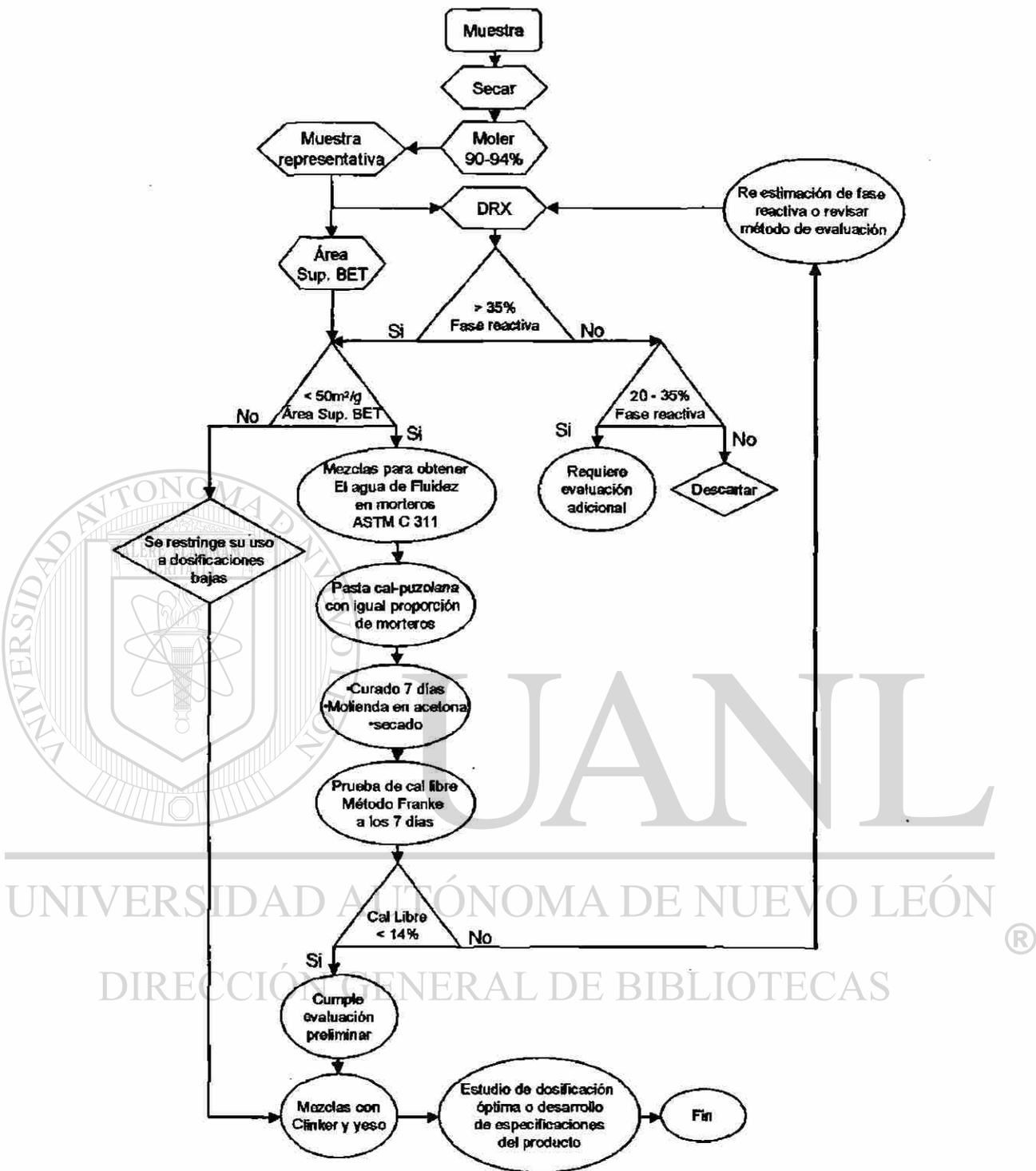
Conforme a los rangos establecidos por Luxan's, las puzolanas PT, PDB y PHCA pueden ser consideradas con buena puzolanicidad, mientras que la puzolana PHCP es considerada como puzolana con puzolanicidad moderada.

Se encontró que la disolución de las puzolanas en este solvente y a esta temperatura provocaron un cambio en la conductividad iónica de la solución en un rango de 2.2 a 0.8 mS/cm, **siendo 2.2 para la puzolana PT que representa al material con la mayor área superficial BET y con 0.8 mS/cm para la puzolana PHCP que es la que menor área superficial presenta**, estos resultados son congruentes con la experimentación realizada en mezclas de cal – puzolanas y ayudan a entender mejor el mecanismo de reacción puzolánica.

### **6.8 Método Propuesto para la Evaluación Rápida de Materiales Naturales con Posibilidad Puzolánica para Usarse en la Producción de Cemento Puzolánico**

Los resultados del índice de actividad a la resistencia obtenidos con cemento portland y para una misma puzolana, indican que la puzolana puede desarrollar diferente potencialidad en función de las características físico-químicas del cemento con el cual se mezcla. Esto fue lo que ocurrió con la puzolana PDB, la cual se mezcló con cada uno de los cementos patrón y presentó índices de actividad a la resistencia diferentes. Por esta razón, en nuestra propuesta no interviene el efecto del cemento. Para un cemento específico se ensayaran las diversas puzolanas ya evaluadas y se determinará su efectividad.

Proponemos el método de evaluación de los materiales naturales con posibilidad puzolánica como se muestra en el diagrama de flujo de la **figura 8**.



**Fig. 8.** Representación esquemática de la metodología propuesta para la evaluación rápida de puzolanas naturales para usarse en la producción de cemento puzolánico.

### Descripción del método de evaluación propuesto:

- 1.- Obtener una muestra representativa del banco en estudio
  - 2.- Secar el material por 24 horas a 100 °C o hasta peso constante
  - 3.- Triturar, pulverizar y moler en molino de bolas hasta lograr una fineza del 90 al 94% que pase la malla # 325.
  - 4.- Homogenizar y cuartear para obtener una muestra representativa.
  - 5.- Realizar el análisis mineralógico utilizando la técnica de difracción de rayos X en polvos menores que 45  $\mu\text{m}$ .
  - 6.- Cuantificar las fases cristalinas y estimar el porcentaje de fase reactiva.
  - 7.- Determinar el área superficial utilizando la técnica de adsorción de nitrógeno y evaluar conforme al método de BET.
  - 8.- Si el material en estudio contiene de un 20 a un 35% de fase reactiva, requiere una evaluación adicional conforme a estándares, pero no se descarta su posible uso. Si el material en estudio tiene menos de un 20% de fase reactiva, descartar su uso como puzolana.
  - 9.- Si la fase reactiva es mayor a un 35% y el área superficial BET es mayor a 50  $\text{m}^2/\text{g}$  se restringe su uso a dosificaciones bajas, para este caso pasar al inciso 15.
- 
- 10.- Si la fase reactiva es mayor a un 35% y el área superficial BET es menor de 50  $\text{m}^2/\text{g}$ , realizar mezclas de morteros cal – puzolana conforme a la norma ASTM C 311-93 para determinar la **cantidad de agua** para dar una fluidez de 105 – 115%.
  - 11.- Con las proporciones encontradas en el inciso 10, fabricar pastas con la misma cantidad de agua y colocarlas en doble bolsa de polietileno herméticamente cerradas y curarlas siete días conforme al método ASTM C 311-93.
  - 12.- Después de cumplir el periodo de curado, moler en abundante acetona y filtrar utilizando un filtro wathman # 41 y secar a 100 °C por 30 minutos.
  - 13.- Determinar el contenido de cal libre por el método Franke Modificado descrito en la norma ASTM C 114.

- 14.- Si el porcentaje de cal libre encontrado es mayor al 14%, es necesario hacer una reestimación de la fase reactiva y revisar el método de cuantificación de esta fase, si el porcentaje de cal libre es menor al 14%, la puzolana natural cumple con la evaluación preliminar.
- 15.- Realizar mezclas de la puzolana con el cemento en estudio y evaluar conforme a las especificaciones.
- 16.- Realizar estudio de dosificación óptima en cuanto a la resistencia mecánica a la compresión y tiempos de fraguado y desarrollar las especificaciones del producto.

Si se cuenta con los resultados preliminares de diferentes bancos puzolánicos que cumplan con el método de evaluación propuesto, es necesario realizar mezclas de las puzolanas con el cemento y en base a la evaluación con los estándares, **seleccionar la puzolana más adecuada para la producción del cemento puzolánico.**

**Aunque es de esperarse variabilidad en la determinación de alguna propiedad utilizada en la evaluación, los valores encontrados están en lo general bien definidos. Con un mayor número de determinaciones de otras puzolanas mexicanas se podría afinar los límites establecidos.**

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 7. Conclusiones

En base a los resultados experimentales de las pruebas estandarizadas y no estandarizadas realizadas en esta investigación, mencionaremos una serie de conclusiones que nos permitan hacer una propuesta sobre una metodología para evaluar los materiales naturales con potencial puzolánico para producir cementos mezclados.

- a) La puzolana **PT** es la puzolana que **presentó mayor área superficial BET y fue la que resultó con mayor reactividad en las mezclas cal-puzolana**, pero esta puzolana no fue la más reactiva con el cemento patrón A.
- b) La puzolana **PDB** presentó la **mayor reactividad con el cemento patrón A, con un 37% menos de área superficial** que la puzolana PT.
- c) Tanto la puzolana **PT** como la puzolana **PDB**, **presentan residuos insolubles** similares pero menores en un 17% que las puzolanas **PHCP** y **PHCA**.
- d) De las cuatro puzolanas, las denominadas **PHCP** y **PHCA** presentan las **más bajas áreas superficiales BET, los menores índices de actividad a la resistencia con el cemento portland y menores índices de actividad puzolánica con cal**. La puzolana **PHCP** presenta la **menor área superficial**. La puzolana **PHCA** tiene el menor contenido de fase vítrea, pero cuenta con un contenido importante de la fase cristobalita y cuenta con casi el doble del área superficial de la puzolana **PHCP**, esta combinación hace que el material tenga tal reactividad por lo cual se considera como puzolana.
- e) El mejor índice de actividad a la resistencia obtenido a los 56 días para la puzolana **PDB** fue en combinación con el **cemento patrón A** en comparación con el cemento B y C. Siendo el cemento patrón A el que cuenta con el mayor contenido de álcalis y alita.

- f) En los cementantes producidos con el cemento patrón A y la puzolana **PT** se manifiesta un **aceleramiento en los tiempos de fraguado** conforme se aumenta la dosificación de la puzolana. Para el 25 y 30 % de sustitución de esta puzolana no se cumple con el tiempo de fraguado inicial establecido por las normas NMX y ASTM, por consiguiente **limita el uso de esta puzolana con este cemento.**
- g) El cemento CPP 30R con un área superficial de 443 m<sup>2</sup>/kg Blaine que es un valor intermedio con respecto a los cementantes producidos en ésta investigación y con una **finieza de 96.7% (< 45 µm), presenta un contenido de puzolana aproximado del 15%**, lo anterior basado en su residuo insoluble, presentó la mayor resistencia mecánica a los 56 días comparada con todas las mezclas de este estudio en donde se sustituyó el 20% del cemento por puzolana.
- h) Existe una relación directa entre el área superficial BET de las puzolanas y la reactividad de los morteros de cal – puzolana, para aproximadamente el mismo contenido de fase reactiva.
- i) Las pruebas de conductividad eléctrica por el método de Luxan's, son congruentes con los resultados de la reactividad puzolánica con cal de los materiales en estudio.
- 
- j) Se desarrolló un método de evaluación rápida (8 días) de materiales naturales con posibilidad puzolánica para usarse en el cemento.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 8. Recomendaciones

En base a la información obtenida en el presente trabajo de investigación y a la consulta del material bibliográfico, se proponen las siguientes líneas de investigación o recomendaciones para posteriores trabajos experimentales.

- El presente trabajo se realizó con cuatro puzolanas de origen natural, y aunque los minerales y sus estructuras encontradas en cada una de ellos fueron diferentes, es recomendable seguir estudiando otros materiales con la metodología aquí propuesta y por consiguiente **ampliar los datos estadísticos** y con estos poder ofrecer una mejor certidumbre en la evaluación.
- Con los cementos puzolánicos producidos, es necesario trabajar en **aspectos de durabilidad en el concreto**, tales como resistencia a los sulfatos, efectividad en la inhibición de la reacción álcali-agregado, mejoramiento de la impermeabilidad, el mejoramiento en su estabilidad dimensional, mejoramiento en la durabilidad en ambientes ácidos, etc.
- Similamente es conveniente trabajar con la metodología propuesta e **iniciar una línea de investigación orientada al uso de puzolanas obtenidas como subproductos industriales** como la ceniza volante de las plantas termoeléctricas, el humo de sílice, la ceniza de la quema de la cascarilla de arroz, la ceniza del bagazo de la caña de azúcar, escorias de fundición, etc.
- Investigar a las puzolanas utilizando **pruebas de reacción aceleradas** y seguir correlacionando los resultados de los residuos insolubles de las puzolanas, los tipos de silicatos de calcio hidratados obtenidos, el área superficial, la resistencia mecánica a la compresión y por supuesto sus propiedades químicas y estructurales.

## 9. Bibliografía

1. P. C. Aïtcin. *Cement and Concrete Development from an Environmental Perspective, Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21<sup>st</sup> Century*, Edited by Odd Gjörv and Koji Sakai, 2000, p. 210.
2. J. Péra, J. Ambroise, and M. Chabannet, *Transformation of Wastes into Complementary Cementing Materials*, p. 459. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, SP199, ACI, Volume 2. 2001.
3. V. S. Ramachandran, *Concrete Admixtures Handbook*, Second Edition, Noyes, 1995, p. 670.
4. [www.nongtang.com/pozzolan.htm](http://www.nongtang.com/pozzolan.htm)
5. ASTM C 618-89. *Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*.
6. Revista "Construcción y Tecnología", Vol. XII, Num. 135, Agosto 1999, p. 6.
7. V. M. Malhotra and Kumar Metha, *Pozzolanic and Cementitious Materials*, Gordon and Breach Publishers. 1996 preface.
8. Kumar Metha y Paulo Monteiro, *Concreto*, IMCYC, 1998, p.135.
9. Leas's, *Chemistry of Cement and Concrete*, edited by Peter C. Hewlett, fourth edition, 1998, p. 263
10. P. C. Aïtcin, *High-Performance Concrete*, E & FN SPON, 1998, p. 116.
11. H.F.W. Taylor, *Cement Chemistry*, Second Edition, Thomas Telford, 1998, p. 221.
12. Ivan Odler, *Special Inorganic Cement*, E & FN SPON, 2000. p. 31.
13. V. M. Malhotra and A.A. Ramezaniapour, *Fly Ash in Concrete*, second edition, CANMET, 1994, p. 19.
14. V.S. Ramachandran, James J. Beaudain, *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology. Principles, Techniques and Applications*, 2001, p. 15.
15. Leas's, *Chemistry of Cement and Concrete*, edited by Peter C. Hewlett, fourth edition, 1998, p. 487

16. V. M. Malhotra and A.A. Ramezaniapour, *Fly Ash in Concrete*, second edition, CANMET, 1994, p. 22.
17. *Use of Natural Pozzolans in Concrete*, ACI 232.1R-94, p. 232.1R-2.
18. Raymundo Rivera Villarreal, *El extraordinario Concreto Prehispánico en México, Parte II*, Revista Ciencia, U.A.N.L., Vol. III Número 3, 2000, P. 247.
19. A. M. Neville, *Properties of Concrete*, Fourth Edition, Wiley, 1996, p. 2.
20. Massazza F., *Pozzolans and Pozzolanic Cement*, Cement-Br. 1/1980'81, Zegreb 1980, p. 3-17.
21. Costa J., Massazza F., *Natural Pozzolans and Fly Ash: Analogies and Differences*. "Proceedings of Symposium N on Effects on Fly Ash incorporation in Cement and Concrete", Boston, November 1981, Material Research Society, p. 134-144.
22. Costa J. Massazza F., *Factors affecting the reaction with lime of Italian Pozzolans*, in: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Congress of the chemistry of cement, Moscow, September 1974, Supplementary papers, section III, p. 2-18.
23. Massazza F., *Chemistry of Pozzolanic additions and mixed cement*, II Cemento, 1976, No. I, p. 3-38.
24. Rachel L. Detwiler, Javed I. Bhatti and Sankar Bhattacharja, *Supplementary Cementing Materials For Use in Blended Cement*, PCA, Bulletin RD112T, 1996.
25. Ramón Poo, *Inhibición de la Reacción álcali-agregado, Utilizando Puzolanas Naturales Mexicanas*, 5<sup>o</sup> Simposio Internacional sobre Tecnología del Concreto, Uso de Puzolanas- Obras Marítimas, Facultad de Ingeniería Civil, U.A.N.L. 1981, p. 18-34.
26. Raymundo Rivera Villarreal and Stefan Kraye, *Ancient Structural Concrete in Mesoamerica*, Concrete International, ACI, June 1996
27. R. Uribe-Aff and R. E. Rodríguez-Camacho, *Mexican Natural Pozzolans and the Evaluation of the Specifications Related to Their Use*, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, SP 153-30, editor V. M. Malhotra, Volume I, ACI, 1995, p. 531.

28. Rosa Elba Rodríguez Camacho, Tesis Maestría con Especialidad en Ciencia de Materiales, *Estudio de Puzolanas Naturales Mexicanas, Determinación de su Velocidad de Reacción*, Instituto Politécnico Nacional, México, D. F., 1994.
29. J. I. Escalante, G. Mendoza, H. Mancha, J. López, G. Vargas, *Pozzolanic properties of a geothermal silica waste material*, Cement and Concrete Research 29. 1999, p. 623-625.
30. Micheline Regourd, *Reactividad Hidráulica de Varias Puzolanas*, 5º Simposio Internacional sobre Tecnología Del Concreto, Uso de Puzolanas-Obras Marítimas, Facultad de Ingeniería Civil, U.A.N.L.1981, p. 7.
31. M. Moranville-Regourd, *Portland Cement-Based Binders-Cements for the Next Millennium*, Modern Concrete Materials Binders, Additions and Admixtures, Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK, Edited by Ravindra K. Dhir and Thomas D. Dyer, 1999, p. 98.
32. A. M. Neville, *Properties of Concrete*, Fourth Edition, Wiley, 1996, p. 84.
33. ASTM C 430-96, *Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- $\mu$ m (No. 325) Sieve*, Section 4, Volume 4.01, 1999, p. 226-228.
34. Kostogloudis, Ftikos, Kasselouri and Philippou, *A Logarithmic Model For the Prediction of Strength Development of Pozzolan Cement*, Modern Concrete Materials Binders, Additions and Admixtures, Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK, Edited by Ravindra K. Dhir and Thomas D. Dyer, 1999, p. 101.
35. Fratini, N., *Controllo Chimica dei Cementi Pozzolanicci*, Annali di Chimica Aplícate 44, 1954, p. 709-718.
36. Guillaume, L., *Controle Simple des Cendres Volantes Pouzzolaniques Aux Ajoutees Aux Ciments Portland artificiels*. In: Revue des Materiaux NR. 517. 1958, p. 272-273.
37. Steope, *Sur la Determination de la Activite Hydraulique des Pouzzolanes*, IN: Revue des Materiaux 1956, NR 492, p. 210-212.

38. Jambor, J., *Une Nouvelle Methode de Determination de L'active Pouzzolanique*, IN: *Revue des Materiaux* NR 564. 1962, p. 240-256.
39. Leonard, R. J., Davidson, D. T., *Pozzolanic Reactivity Study of Fly Ash*. IN: *Highway Research Board Bulletin* 231, 1958, p. 1-13.
40. Hubbard, F. H., Dhir, R. K. *A Compositional Index of the Pozzolanic Potencial of Pulvericed-Fuel Ash*. IN: *Journal of Materials Science Letters*, 1984. p. 958-960.
41. S. Ohsawa, K. Asaga, S. Goto, M. Daimon, *Quantitative Determination of Fly Ash in the Hydrated Fly Ash – CaSO<sub>4</sub> – Ca(OH)<sub>2</sub> System*. *Cem. Concr. Res.* 15 (2), 1985. p. 357-366.
42. S. Li, D. M. Roy, A. Khmer, *Quantitative Determination of Pozzolanas in Hydrated System of Cement or Ca(OH)<sub>2</sub> with Fly Ash or Silica Fume*, *Cem. Concr. Res.* 15 (6), 1985. p. 1079-1086.
43. C. Tashiro, K. Ikeda, Y. Inome, *Evaluation of Pozzolanic Activity by the Electric Resistente Measurement Method*, *Cem. Concr. Res.* 24, 1994. p. 1133-1139.
44. R. C. Sharma, N. K. Jain, S. N. Ghosh, *Semi – Theoretical Method for the Assessment of Reactivity of Fly Ashes*, *Cem. Concr. Res.* 23, 1993. p. 41-45.
45. E. Raask, M. C. Bhaskar, *Pozzolanic Activity of Pulverized Fuel Ash*, *Cem. Concr. Res.* 5, 1975. p. 363-376.
46. E. Raask, *Pulverized Fuel Ash Constituents and Surface Characteristics in Concrete Applications*, J. G. Cabrera, A. R. Cuseus (Eds), *Proceedings of the International Symposium on the Use of PFA in Concrete*, Leeds, Vol. 1, 1982, p. 5-16.
47. Luxan's, M. P., Madruga M. and Saavedra J., *Rapid Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural Products by Conductivity Measurement*, *Cem. Concr. Res.* Vol. 19, No. 1, 1989, p. 63-68.
48. ASTM C 595-98, *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*, Section 4, Volume 4.01, 1998, p. 301-306.

49. ASTM C 618-98, *Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*, Section 4, Volume 4.02, 1989, p. 296-298.
50. ASTM C 311-93, *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland- Cement Concrete*, Section 4, Volume 4.02, 1993, p. 192-197.
51. NMX-C-414-ONNCCE-1999, Norma Mexicana, *Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos – Especificaciones y Métodos de Prueba*.
52. ASTM C 114-99, *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*, Section 4, Volume 4.01, 1999, p. 99-129.
53. Eric Lifshin, *X-ray Characterization of materials*, Wiley – VCH, p. 82.
54. ASTM C 150-98, *Standard Specification for Portland Cement*, Section 4, Volume 4.01, 1996, p. 130-134.
55. ASTM C 188-95, *Standard Test Methods for Density of Hydraulic Cement*, Section 4, Volume 4.01, 1996, p. 158-159.
56. ASTM C 109-98, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*, Section 4, Volume 4.01, 1996, p. 194-196.
57. ASTM C 778-92, *Standard Specification for Standard Sand*, Section 4, Volume 4.01, 1996, p. 337-339.
- 
58. ASTM C 305-94, *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*, Section 4, Volume 4.01, 1996, p. 194-196.
59. ASTM C 204-96, *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus*, Section 4, Volume 4.01, 1998, p. 167-173.
60. ASTM C 187-98, *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*, Section 4, Volume 4.01, 1999, p. 166-167.
61. ASTM C 191-99, *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.*, Section 4, Volume 4.01, 1999, p. 170-172.
62. Kumar Metha & Paulo J. M. Monteiro, *Concrete*, Indian Edition, 1999, p. 228.
63. C. S. Poon, S. C. Kou, L. Lam, Z. S. Lin, *An Innovative Method in Producing High Early Strength PFA Concrete*, *Modern Concrete Materials: Binders*,

additions and admixtures, Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK, 1999, p. 132.

64. F. Sybertz, *Comparison of Different Method for Testing the Pozzolanic Activity of Fly Ashes, Fly Ash, Silica Fume, Slags, and Natural Pozzolans in Concrete*, Proceedings Third International Conference Trondheim, Norway, 1989. SP 114. p. 485.
65. F. de Larrard, *Ultrafine Particles for Making Very High Performance Concretes*, High Performance Concrete, Edited by Ives Malier, E&FN Spon, 1994, p. 44.
66. Ivan Odler, *Special Inorganic Cement*, E & FN SPON, 2000. p. 150.
67. <http://mineral.galleries.com/minerals/silicate/cristoba/cristoba.htm>
68. Takemi Shibuya, *Journal of the Society of Materials Science*, (Kyoto) V. 35, No 392, 1986, p. 496-501.
69. Caijun Shi, Robert L. Day, *Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators Part I. Reaction kinetics*, Cement and Concrete Research, 30, 2000, p. 607-613.
70. Caijun Shi, Robert L. Day, *Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators Part II. Reaction products and mechanism*, Cement and Concrete Research, 30, 2000, p. 607-613.



# Anexo de Tablas

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Tabla No. 1**  
**Finezas y Densidades de Materiales**

Material	Fineza # 325	Densidad g/cm <sup>3</sup>
Clinker A	91.1	3.11
Clinker B	92.3	3.09
Clinker C	90.0	3.19
Yeso	94.0	2.32
PT	90.2	2.48
PDB	91.2	2.35
PHCP	92.2	2.42
PHCA	92.3	2.50
CPP 30R	96.7	3.00
Arena de Sílice	Conforme a ASTM	2.65

**Tabla No. 2**  
**Diámetro Medio de los Materiales Molidos en (µm) Obtenidas por Medio de Equipo Malvern, Mastersize 2000**

Material								
PT	PDB	PHCA	PHCP	Yeso	Cemento A	Cemento B	Cemento C	Cemento CPP 30R
15.06	13.95	10.37	13.61	13.61	13.72	10.81	10.28	13.62

**Tabla No. 3**  
**Composición Química de los Materiales, % en peso**

Elemento	Clinker A	Clinker B	Clinker C	Yeso	PT	PDB	PHCA	PHCP	CPP 30R
SiO <sub>2</sub>	20.67	20.73	21.41	0.78	59.48	64.91	72.57	70.23	25.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.51	5.55	5.69	0.13	17.03	11.80	12.00	12.31	6.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.18	2.85	3.51	0.17	4.70	2.94	1.93	2.17	3.25
CaO	65.75	64.85	65.32	28.14	4.70	4.21	2.78	2.16	54.67
MgO	1.42	0.96	0.61	0.11	1.85	1.43	0.43	0.55	1.24
SO <sub>3</sub>	1.42	1.82	1.28	44.50	0.00	0.07	0.00	0.00	3.59
Na <sub>2</sub> O	0.48	0.05	0.08	0.06	1.64	1.61	2.85	2.36	0.51
K <sub>2</sub> O	1.02	1.37	0.31	0.04	1.11	1.95	4.36	5.14	0.61
TiO <sub>2</sub>	0.24	0.25	0.29	Agua Libre y Combinada 20.00	0.67	0.33	0.20	0.23	0.25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.17	0.11		0.03	0.04	0.01	0.02	0.04
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.07	0.04		0.09	0.12	0.04	0.05	0.07
Pxl 950°C	0.403	0.257	0.485		7.75	10.302	1.502	3.536	2.918
Suma	99.23	98.91	99.14		99.06	99.70	98.67	98.76	98.97
Na <sub>2</sub> O eq.	1.13	0.95	0.28		2.37	2.90	5.72	5.75	0.91
Residuo Insoluble	0.23	0.23	0.23		69.83	69.80	86.46	86.92	10.82
Cal Libre	1.18	0.47	0.92		ver mezclas cal + puzolanas				0.63
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.36	29.12	30.62		81.22	79.64	86.50	84.71	34.98

**Tabla No. 4**  
**Áreas Superficiales y Porosidades Totales, Determinadas por**  
**Adsorción de Nitrógeno y Analizadas por BET**

Material	Área específica BET m <sup>2</sup> /g	Porosidad Total % en volumen
PT	63.13	25.94
PDB	39.58	20.44
PHCA	8.83	7.90
PHCP	4.61	2.81
CPP 30R	6.30	4.85

**Tabla No. 5**  
**Fases Minerales y Estimación del % en peso de Matriz Vítreo de**  
**Puzolanas.**

Material	Fases	% de Matriz Vítreo
PT	- Labradorita (Na,Ca)Al <sub>3</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>16</sub> - Cristobalita, SiO <sub>2</sub> - Cuarzo, SiO <sub>2</sub> - Magnetita, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	35 – 43
PDB	- Anortita, CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> - Calcita, CaCO <sub>3</sub> - Cuarzo, SiO <sub>2</sub> - Magnetita, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	40 – 42
PHCA	- Albita desordenada, NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> - Ortoclasa, KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> - Cristobalita, SiO <sub>2</sub> (37%) - Cuarzo, SiO <sub>2</sub>	8 -10
PHCP	- Albita desordenada, NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> - Cristobalita, SiO <sub>2</sub> - Nefelita, K(Na,K) <sub>3</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>16</sub>	36 – 38

**Tabla No. 6**  
**Descripción Petrográfica de Las Puzolanas**

Material	Descripción
PT	<p><b>Toba Vítreo</b>            Textura Piroclástica, matriz criptocristalina con vidrio de composición ácida. Fragmentos de feldespatos e hidróxido de Hierro</p> <p>Clasificación geológica: <b>Andesita</b></p>
PDB	<p><b>Traquidacita</b>            Roca volcánica Piroclástica, textura porfirítica fluidal contiene feldespatos alcalinos, plagioclasas y escasamente se reconocen cristales tabulares de clinopiroxenos, así mismo se observan fenocristales de cuarzo, lo anterior en una matriz vítrea.</p> <p>Clasificación geológica: <b>Dacita</b></p>
PHCA	<p><b>Pumicita</b>            Textura vítrea con matriz de vidrio con composición ácida.</p> <p>Clasificación geológica: <b>Riolita</b></p>
PHCP	<p><b>Toba vítrea</b>            Textura Piroclástica de grano fino con fragmentos de feldespatos</p> <p>Clasificación geológica: <b>Riolita</b></p>

**Tabla No. 7**  
**Combinación de Materiales para Determinar el Contenido Óptimo de Yeso en Cemento Patrón "B"**

% de Materiales (peso)		SO <sub>3</sub> en el Cemento	Resistencia Promedio a la Compresión kgf/cm <sup>2</sup> - 24 h
Clinker	Yeso		
98.172	1.828	2.6	191.5
97.938	2.062	2.7	205.2
97.704	2.296	2.8	207.3
97.470	2.530	2.9	218.0
97.235	2.765	3.0	227.3
97.001	2.999	3.1	235.0
96.767	3.233	3.2	238.8
96.532	3.468	3.3	244.1
96.298	3.702	3.4	243.1
96.064	3.936	3.5	238.0

A/CM = 0.485  
 SO<sub>3</sub> en clinker = 1.82 %  
 SO<sub>3</sub> en yeso = 44.5 %

**Tabla No. 8**  
**Combinación de Materiales para Determinar el Contenido Óptimo de Yeso en Cemento Patrón "C"**

% de Materiales (peso)		SO <sub>3</sub> en el Cemento	Resistencia Promedio a la Compresión kgf/cm <sup>2</sup> - 24 h
Clinker	Yeso		
97.177	2.823	2.5	98.0
96.946	3.054	2.6	104.1
96.714	3.286	2.7	112.2
96.483	3.517	2.8	111.5
96.252	3.748	2.9	113.3
96.020	3.980	3.0	124.4
95.789	4.211	3.1	125.7
95.558	4.442	3.2	128.7
95.326	4.674	3.3	138.1
95.095	4.905	3.4	146.3
94.632	5.368	3.6	150.7
94.169	5.831	3.8	153.9
93.475	6.525	4.1	153.2
92.781	7.219	4.4	148.7
92.087	7.913	4.7	134.7

A/CM = 0.485  
 SO<sub>3</sub> en clinker = 1.28 %  
 SO<sub>3</sub> en yeso = 44.5 %

**Tabla No. 9**  
**Compuestos Potenciales de los Cementos Patrón Conforme a**  
**ASTM C 150 (% en peso)**

Compuesto Potencial	Cemento Patrón A %	Cemento Patrón B %	Cemento Patrón C %
C <sub>3</sub> S	62.99	57.41	52.58
C <sub>2</sub> S	9.12	14.01	18.26
C <sub>3</sub> A	10.41	9.52	8.61
C <sub>4</sub> AF	6.35	8.37	10.09

**Tabla No. 10**  
**Diseño de Mezclas de Morteros de Cementos Patrón, conforme a**  
**ASTM C 109, para fluidez de 105 – 115%.**

<b>CEMENTANTES PATRÓN</b>				
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>CPP30R</b>
<b>% Clinker</b>	95.404	96.298	94.169	100
<b>% Yeso</b>	4.596	3.702	5.831	
<b>% Puzolana</b>	0.000	0.000	0.000	
<b>A/C</b>	0.530	0.540	0.550	0.555
<b>% Fluidez</b>	106.5	106.5	106.0	111.0
<b>SO<sub>3</sub></b>	3.4	3.4	3.8	3.6
<b>Blaine m<sup>2</sup>/kg</b>	380	427	468	443

**Tabla No. 11**  
**Resistencias a la Compresión del Cementante CPP 30R.**

Edad Días	Esfuerzo kgf/cm <sup>2</sup> ♣
1	145
3	245
7	323
14	391
28	430
56	488

♣ Promedio de tres especímenes, evaluados conforme a ASTM C 109-98

**Tabla No. 12**  
**Diseño de Mezclas para Determinar el Consumo Óptimo de**  
**Puzolanas con el Cemento Patrón A (% en peso)**

Material	A + PT			A + PDB			A + PHCP			A + PHCA		
	20	25	30	20	25	30	20	25	30	20	25	30
Puzolana	20	25	30	20	25	30	20	25	30	20	25	30
Clinker	76.3	71.6	66.8	76.3	71.6	66.8	76.3	71.6	66.8	76.3	71.6	66.8
Yeso	3.7	3.5	3.2	3.7	3.5	3.2	3.7	3.5	3.2	3.7	3.5	3.2
A/CM	0.560	0.577	0.595	0.518	0.520	0.526	0.520	0.526	0.534	0.550	0.565	0.575
% Fluidéz	105	105	107	114	112	107	113	113	115	106	109	112
SO <sub>3</sub>	2.72	2.55	2.38	2.72	2.55	2.38	2.72	2.55	2.38	2.72	2.55	2.38
Blaine m <sup>2</sup> /kg	484	533	548	442	457	463	409	420	419	494	520	565

**Tabla No. 13**

**Diseño de Mezclas para Determinar el Consumo Óptimo de Puzolana PDB Con los Cementos Patrón B y C (% en peso)**

Material	Cemento B + PDB			Cemento C + PDB		
	20	25	30	20	25	30
Puzolana	20	25	30	20	25	30
Clinker	77.04	72.22	67.41	75.34	70.63	65.92
Yeso	2.96	2.78	2.59	4.66	4.37	4.08
A/CM	0.574	0.580	0.590	0.585	0.610	0.620
% Fluidéz	115	114	114	107	112	114
SO <sub>3</sub>	2.72	2.55	2.38	3.04	2.85	2.66
Blaine m <sup>2</sup> /kg	464	479	490	518	531	529

**Tabla No. 14**

**Resistencias a la Compresión del Cemento Patrón A y con Adiciones de 20, 25 y 30 % de Las Puzolanas PT, PDB, PHCA y PHCP.**

Edad Días	Patrón A Esfuerzo kgf/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo kgf/cm <sup>2</sup> ♣											
		Patrón A + % PT			Patrón A + % PDB			Patrón A + % PHCA			Patrón A + % PHCP		
		20	25	30	20	25	30	20	25	30	20	25	30
1	187	138	119	104	166	143	124	130	111	97	136	118	107
3	259	228	224	204	235	212	198	218	197	172	212	210	186
7	319	286	255	248	288	281	274	260	247	225	279	267	254
14	379	313	304	293	328	324	324	294	272	253	302	280	257
28	390	336	358	331	373	378	358	311	298	273	330	297	294
56	407	385	377	374	415	415	420	328	318	303	377	362	352

♣ Promedio de tres especímenes, evaluados conforme a ASTM C 109-98

**Tabla No. 15**

**Resistencias a la Compresión del Cemento Patrón B y con Adiciones de 20, 25 y 30 % de Puzolana PDB.**

Edad Días	Patrón B Esfuerzo kgf/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo kgf/cm <sup>2</sup> Patrón B + % PDB ♣		
		20	25	30
1	207	124	105	83
3	265	207	187	163
7	378	296	256	228
14	407	337	298	269
28	435	390	366	339
56	455	410	392	382

♣ Promedio de tres especímenes, evaluados conforme a ASTM C 109-98

**Tabla No. 16**

**Resistencias a la Compresión del Cemento Patrón C y con Adiciones de 20, 25 y 30 % de Puzolana PDB.**

Edad Días	Patrón C Esfuerzo kgf/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo kgf/cm <sup>2</sup> Patrón C + % PDB ♣		
		20 %	25 %	30 %
1	128	75	54	43
3	180	121	104	88
7	383	238	181	163
14	472	344	303	288
28	547	417	383	341
56	554	477	424	371

♣ Promedio de tres especímenes, evaluados conforme a ASTM C 109-98

**Tabla No. 17**

**Índices de Actividad a la Resistencia entre el Cemento Patrón A y con Adiciones de 20, 25 y 30 % de las Puzolanas PT, PDB, PHCA y PHCP**

Edad Días	Patrón A Referencia	% de Resistencia con Respecto al Patrón A											
		Patrón A + % PT			Patrón A + % PDB			Patrón A + % PHCA			Patrón A + % PHCP		
		20	25	30	20	25	30	20	25	30	20	25	30
1	100	74	64	56	89	76	66	70	59	52	73	63	57
3	100	88	87	79	91	82	76	84	76	66	82	81	72
7	100	90	80	78	90	88	86	81	78	71	87	84	80
14	100	82	80	77	87	85	85	78	72	67	80	74	68
28	100	86	92	85	96	97	92	80	76	70	85	76	75
56	100	95	93	92	102	102	103	81	78	75	93	89	87

**Tabla No. 18**

**Índices de Actividad a la Resistencia entre el Cemento Patrón B y con Adiciones de 20, 25 y 30 % de Puzolana PDB**

Edad Días	Patrón B Referencia	% de Resistencia con Respecto al Patrón B		
		20 %	25 %	30 %
1	100	60	51	40
3	100	78	70	61
7	100	78	68	60
14	100	83	73	66
28	100	90	84	78
56	100	90	86	84

**Tabla No. 19**  
**Índices de Actividad a la Resistencia entre el Cemento Patrón C y con Adiciones de 20, 25 y 30 % de Puzolana PDB**

Edad Días	Patrón C Referencia	% de Resistencia con Respecto al Patrón C		
		20 %	25 %	30 %
1	100	59	42	34
3	100	67	58	49
7	100	62	47	43
14	100	73	64	61
28	100	76	70	62
56	100	86	77	67

**TABLA No. 20**  
**Áreas Superficiales de los Cementantes Obtenidas por el Método**  
**de Permeabilidad al Aire "Blaine" (ASTM C 204)**

Material	Prueba #	T	Blaine cm <sup>2</sup> /g	Blaine Medio cm <sup>2</sup> /g
Cemento A	1	76.5	3786	3804
	2	77.9	3821	
Cemento B	1	97.5	4275	4265
	2	96.6	4255	
Cemento C	1	119.3	4728	4682
	2	114.7	4636	
CPP 30R	1	103.1	4396	4430
	2	106.3	4463	
A + 20% PT	1	125.3	4846	4836
	2	124.3	4826	
A + 25% PT	1	151.8	5334	5332
	2	151.6	5330	
A + 30% PT	1	155.4	5397	5476
	2	164.7	5556	
A + 20% PDB	1	104.8	4432	4417
	2	103.4	4402	
A + 25% PDB	1	113.6	4614	4571
	2	109.4	4528	
A + 30% PDB	1	114.8	4638	4634
	2	114.4	4630	
A + 20% PHCP	1	89.0	4084	4089
	2	89.4	4093	
A + 25% PHCP	1	94.6	4211	4197
	2	93.4	4184	
A + 30% PHCP	1	91.6	4143	4187
	2	95.5	4231	
A + 20% PHCA	1	129.4	4925	4936
	2	130.6	4947	
A + 25% PHCA	1	147.4	5256	5200
	2	141.2	5144	
A + 30% PHCA	1	171.5	5669	5648
	2	168.9	5626	
B + 20% PDB	1	113.9	4620	4637
	2	115.6	4655	
B + 25% PDB	1	120.6	4754	4788
	2	124.1	4823	
B + 30% PDB	1	128.3	4904	4904
	2	128.3	4904	
C + 20% PDB	1	143.4	5184	5180
	2	143.0	5177	
C + 25% PDB	1	151.5	5328	5305
	2	148.8	5281	
C + 30% PDB	1	150.1	5304	5293
	2	148.9	5283	

T = Tiempo Blaine

**Tabla No. 21**

**Consistencia Normal y Tiempos de Fraguado VICAT para cada Cementante**

Cementante	% Consistencia Normal	Tiempos de Fraguado VICAT en minutos	
		Inicial	Final
<b>A</b>	24.5	51	109
<b>A + 20% PT</b>	26.8	49	151
<b>A + 25% PT</b>	27.5	41	125
<b>A + 30% PT</b>	27.8	32	116
<b>A + 20% PDB</b>	27.7	75	155
<b>A + 25% PDB</b>	28.8	69	137
<b>A + 30% PDB</b>	30.3	73	158
<b>A + 20% PHCP</b>	26.0	68	160
<b>A + 25% PHCP</b>	26.6	76	162
<b>A + 30% PHCP</b>	27.0	76	158
<b>A + 20% PHCA</b>	25.8	60	133
<b>A + 25% PHCA</b>	26.5	67	143
<b>A + 30% PHCA</b>	26.8	74	150
<b>B</b>	25.5	47	116
<b>B + 20% PDB</b>	28.0	88	180
<b>B + 25% PDB</b>	28.9	85	177
<b>B + 30% PDB</b>	30.3	91	174
<b>C</b>	25.1	45	101
<b>C + 20% PDB</b>	28.9	59	137
<b>C + 25% PDB</b>	30.1	65	138
<b>C + 30% PDB</b>	32.0	76	144
<b>CPP 30 R</b>	29.1	89	165

La especificación ASTM C 150-97, limita a 45 minutos como mínimo el tiempo de fraguado Vicat para el cemento portland tipo I, mientras que establece 375 minutos máximo.

La especificación ASTM C 595-98, limita a 45 minutos como mínimo el tiempo de fraguado Vicat para el cemento I P, mientras que establece 420 minutos máximo.

**Tabla No. 22****Proporciones para la Elaboración de Morteros Cal-Puzolana y su Resistencia a la Compresión a los 7 días**

Material	Cantidad g	Ca(OH) <sub>2</sub> g	Arena Graduada ASTM g	Agua g	A/CM	Fluidez %	Esfuerzo kgf/cm <sup>2</sup>	Área Sup. BET m <sup>2</sup> /g
PT	287.3	133.2	1198.9	319.6	0.760	113.5	136	63.13
PDB	272.5	133.4	1200.4	306.1	0.754	105.0	101	39.58
PHCP	280.5	133.3	1199.5	258.6	0.625	105.0	95	4.61
PHCA	289.6	133.2	1198.8	288.8	0.683	115.0	69	8.83
90% PHCA + 10% SiO <sub>2</sub>	289.6	133.2	1198.8	282.4	0.668	106.0	50	

A/CM = Relación Agua / Cementante

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Tabla No. 23**  
**Cinética de Reacción Puzolánica en pastas Cal-Puzolana**

Material	Edad (Días)	% de Cal Libre	Ecuación	Coefficiente de Correlación
<b>PT</b>	0	31.68	$Y=16.004 X^{-0.3385}$	0.972
	1	17.86		
	3	12.09		
	7	8.05		
	14	7.14		
	21	4.85		
<b>PDB</b>	0	32.86	$Y=19.107 X^{-0.2563}$	0.982
	1	20.77		
	3	14.21		
	7	11.61		
	14	10.46		
	21	7.96		
<b>PHCP</b>	0	32.31	$Y=20.89 X^{-0.1927}$	0.981
	1	22.03		
	3	16.19		
	7	13.71		
	14	13.58		
	21	11.27		
<b>PHCA</b>	0	31.51	$Y=20.757 X^{-0.1817}$	0.991
	1	20.91		
	3	16.80		
	7	14.32		
	14	13.66		
	21	11.49		
<b>PHCA + 10% SiO<sub>2</sub></b>	0	31.51	$Y=22.149 X^{-0.1583}$	0.998
	1	22.61		
	3	18.49		
	7	16.46		
	14	14.66		
	21	13.43		

**Tabla No. 24**

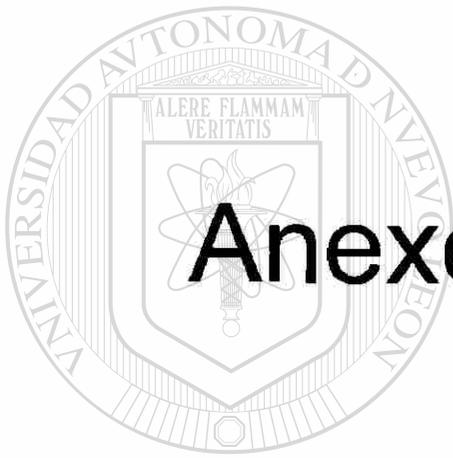
**Conductividades Iónicas de mezclas "Puzolanas Naturales- Solución 0.5 % de NaOH" "MÉTODO LUXAN'S" (mS/cm)**

<b>Puzolana</b>	<b>Solución 0.5 % de NaOH a 40° C E<sup>0</sup></b>	<b>Solución: Puzolana + 0.5% NaOH E<sup>1</sup></b>	<b>Diferencia E = E<sup>0</sup> - E<sup>1</sup></b>	<b>Puzolanicidad <u>LUXAN'S</u></b>
PT	22.9	20.7	2.2	BUENA
PBD	23.8	21.5	2.3	BUENA
PHCA	23.7	22.4	1.3	BUENA
PHCP	23.5	22.7	0.8	MODERADA

Valores expresados en mS/cm

Determinaciones en 200 mL de solución con 5g de puzolana.

<b>Puzolanicidad</b>	<b>Cambio en la Conductividad mS/cm</b>
BUENA	Mayor de 1.2
MODERADA	Entre 1.2 - 0.4
NO PUZOLÁNICO	Menor de 0.4



# Anexo de Gráficas

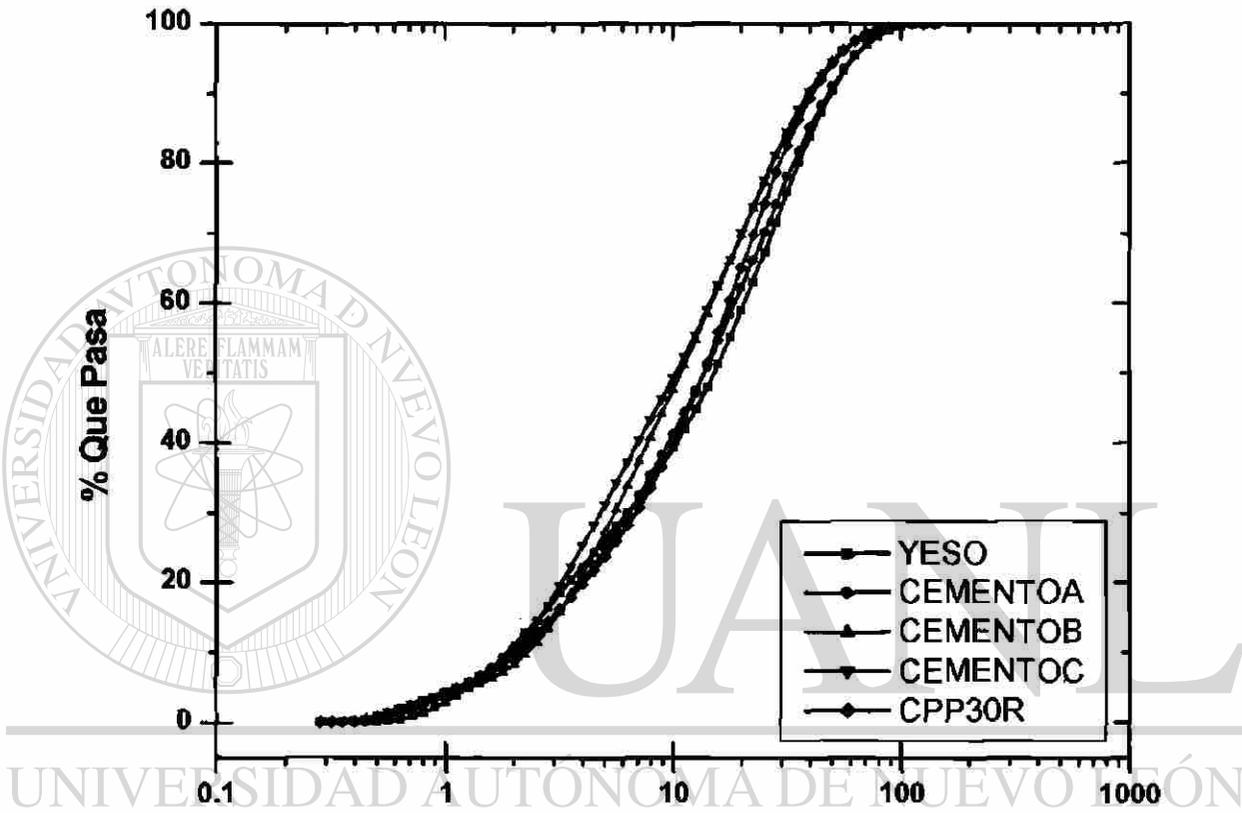
UANL

---

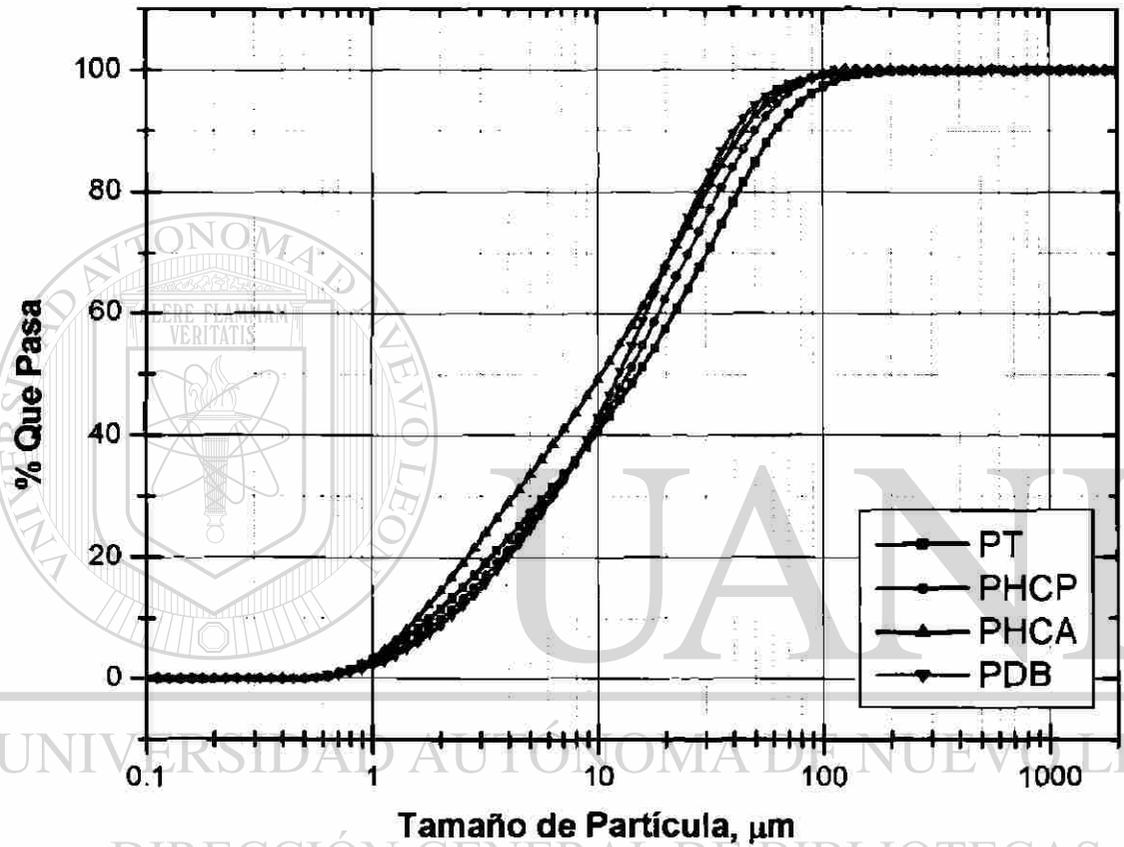
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

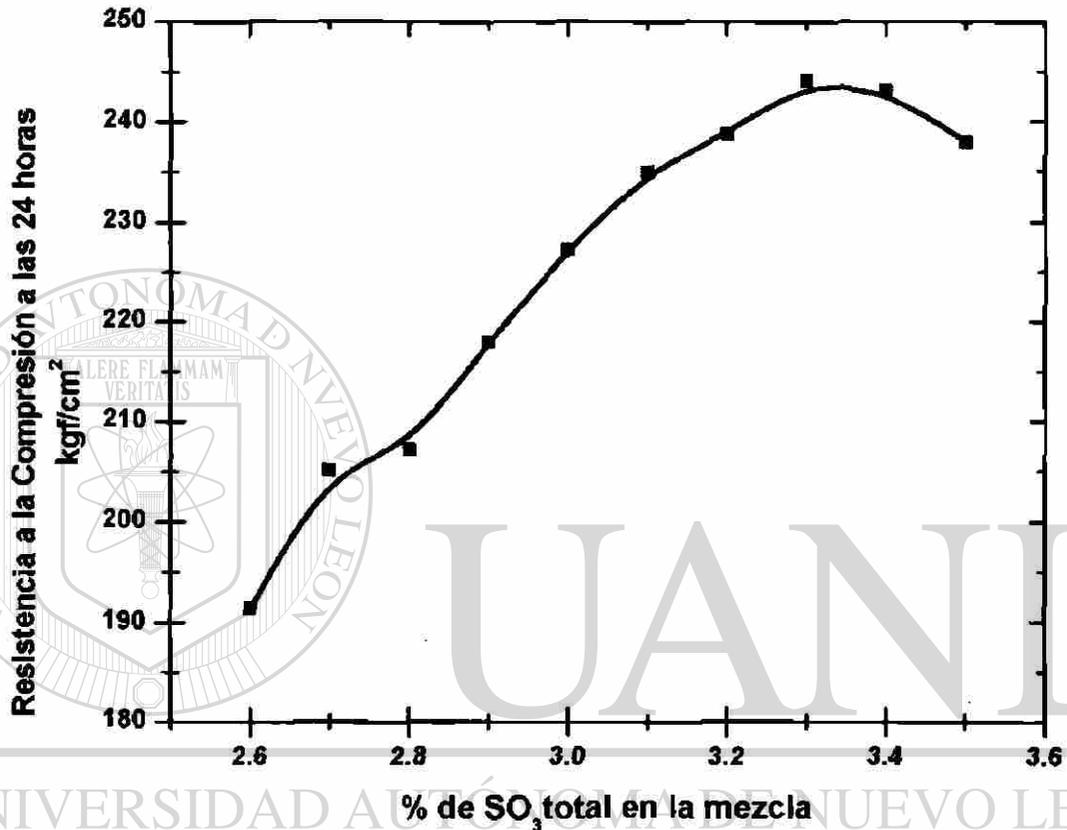


**Gráfica 1. Distribución de Tamaño de Partículas del Yeso y Cementantes Patrón Obtenidas por Medio de Equipo Malvern, Mastersize 2000.**

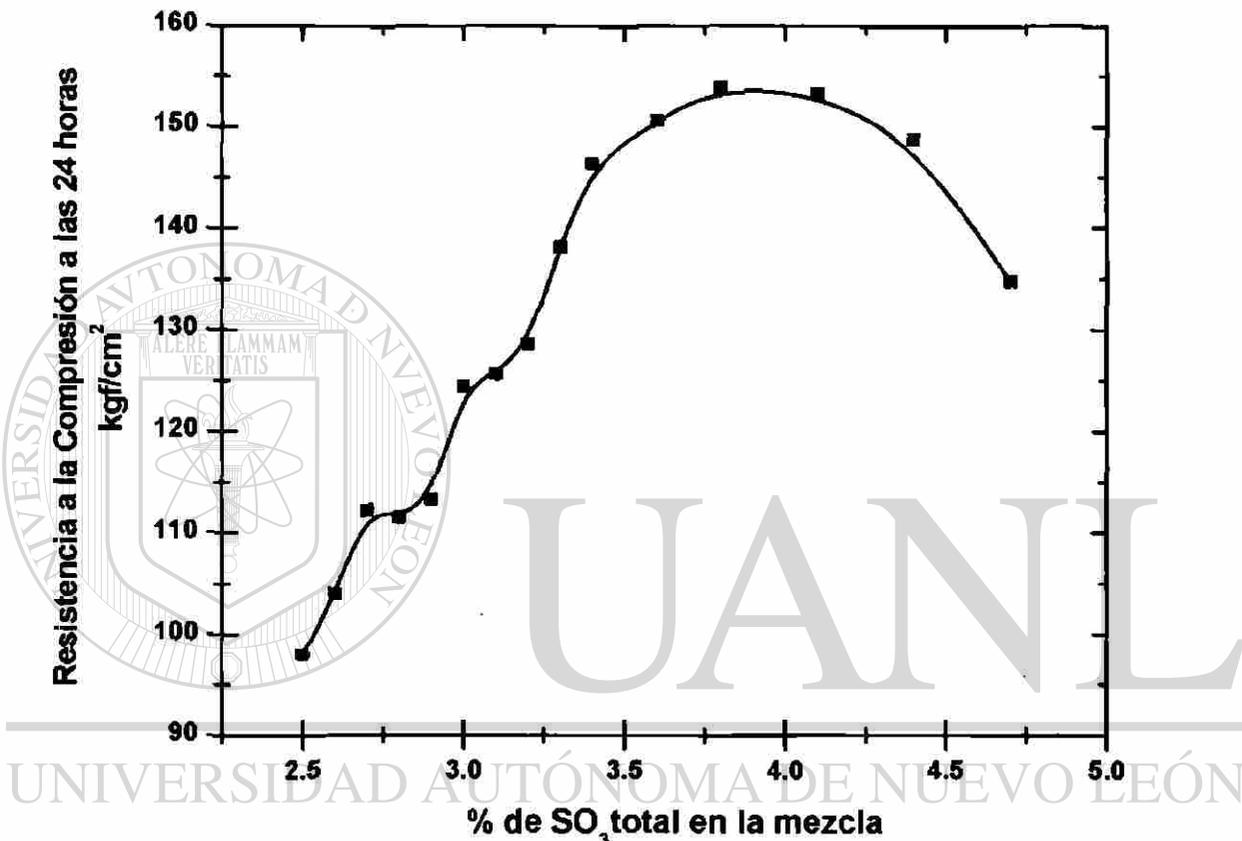


**Gráfica 2. Distribución de Tamaño de Partículas de las Puzolanas Obtenidas por Medio de Equipo Malvern, Mastersize 2000.**



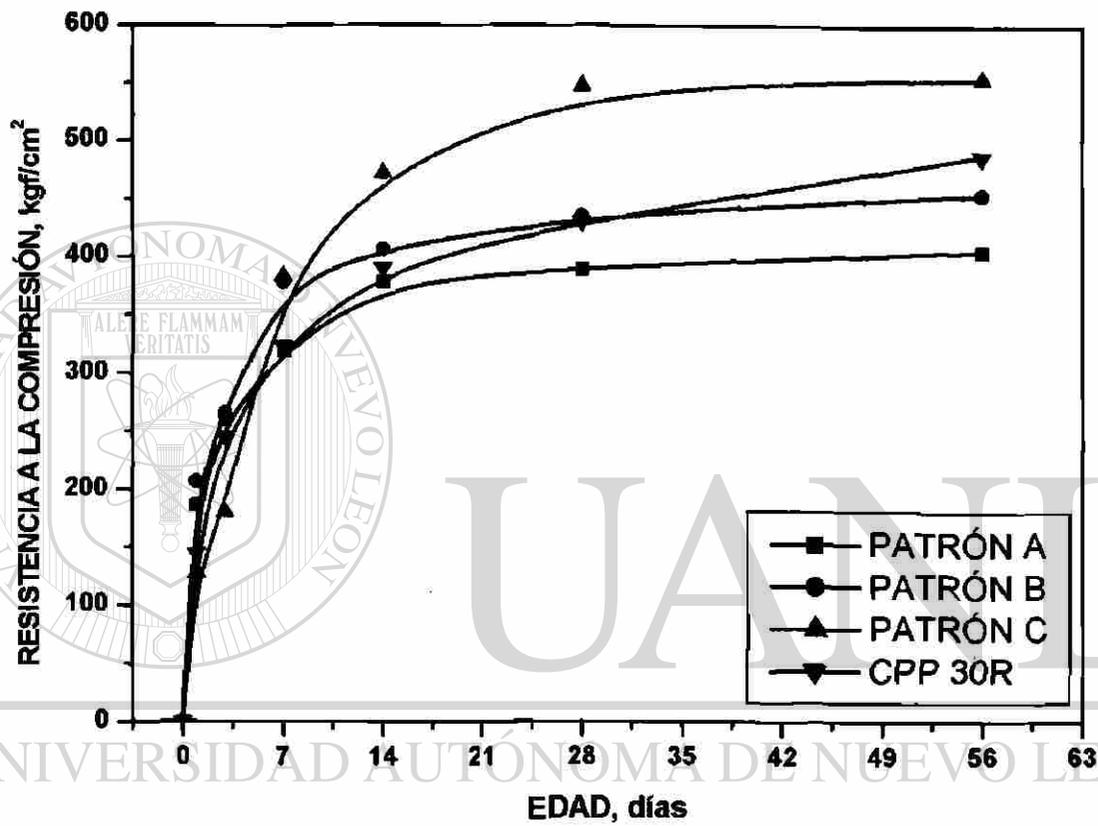


**Gráfica 4. Resistencia a la Compresión de Cubos Fabricados con Diferentes Dosis de Yeso para Determinar el Contenido Óptimo de SO<sub>3</sub> en Cemento Patrón "B".**

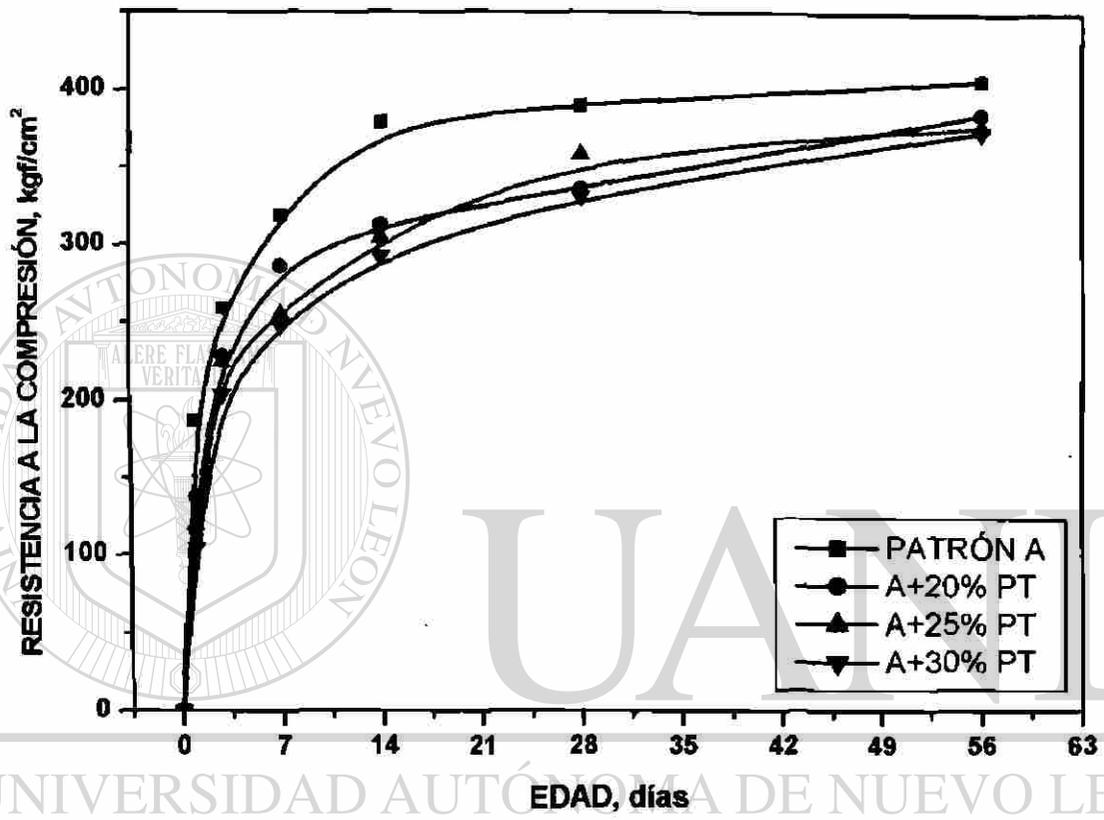


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

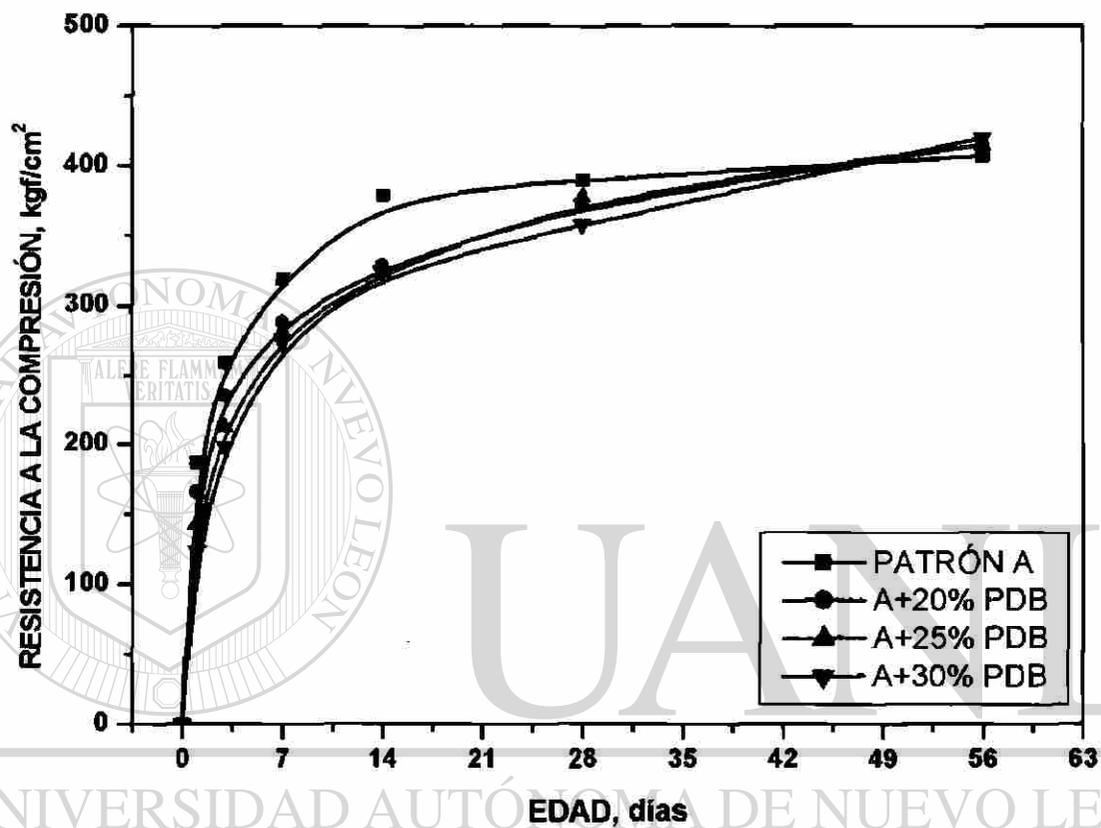
**Gráfica 5. Resistencia a la Compresión de Cubos Fabricados con Diferentes Dosis de Yeso para Determinar el Contenido Óptimo de SO<sub>3</sub> en Cemento Patrón "C".**



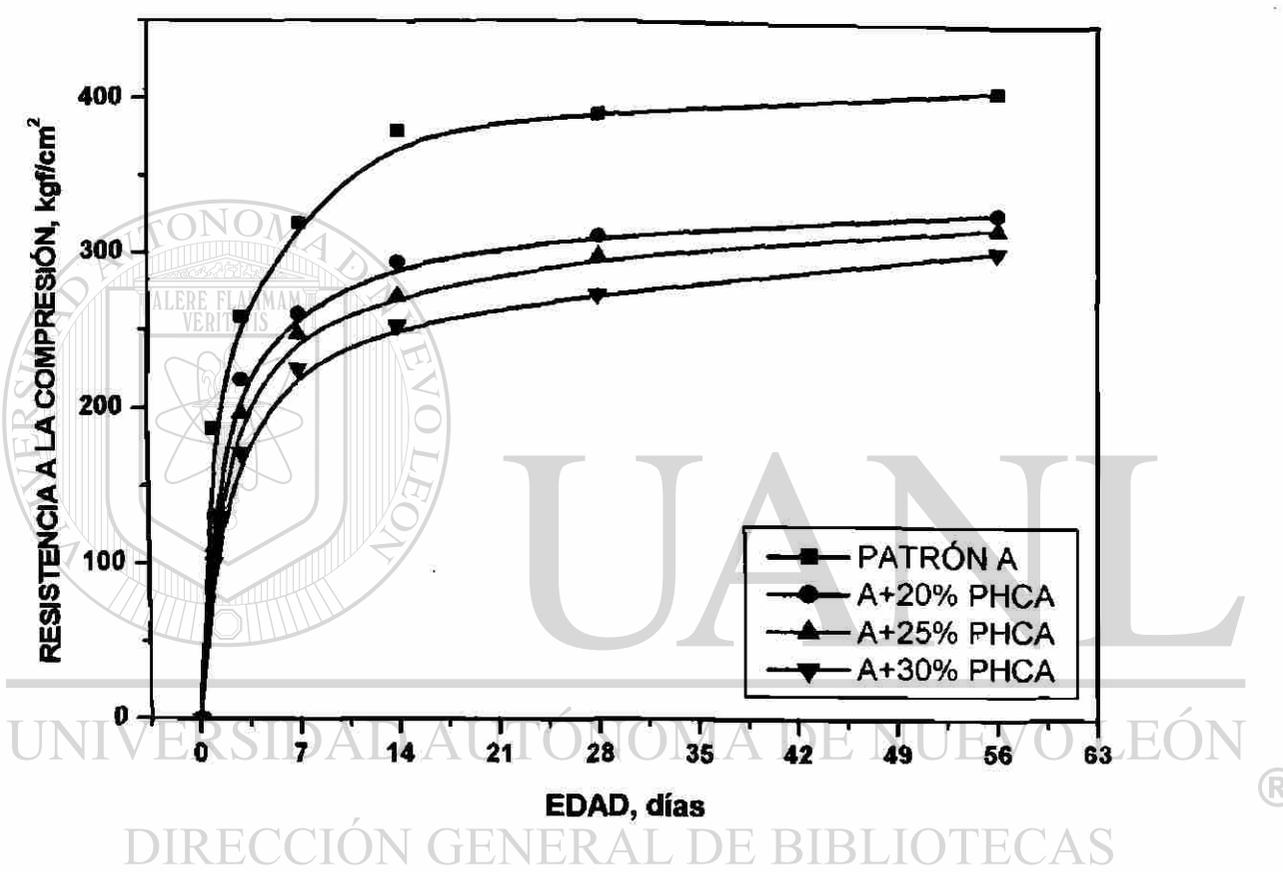
**Gráfica 6. Desarrollo de la Resistencia Mecánica a la Comprensión de Cementantes Patrón.**



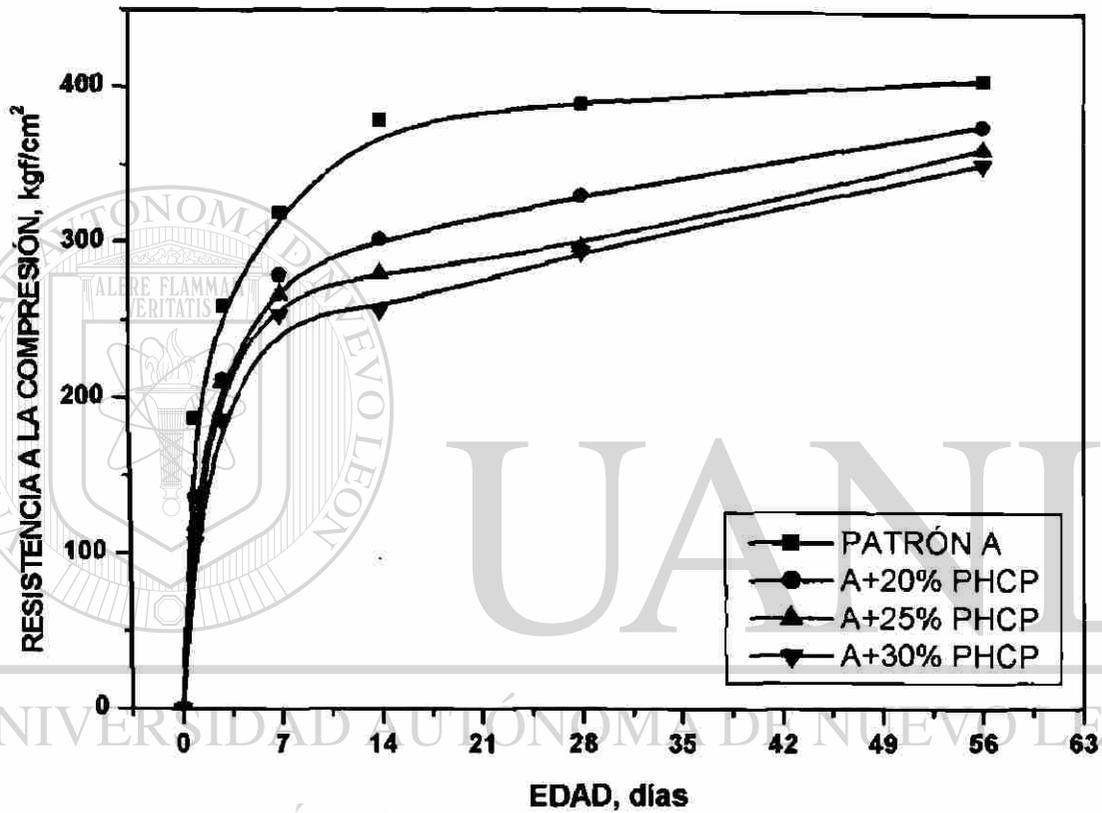
**Gráfica 7. Desarrollo de la Resistencia Mecánica a la Comprensión del Cemento Patrón A y las Sustituciones del 20, 25 y 30% por Puzolana PT.**



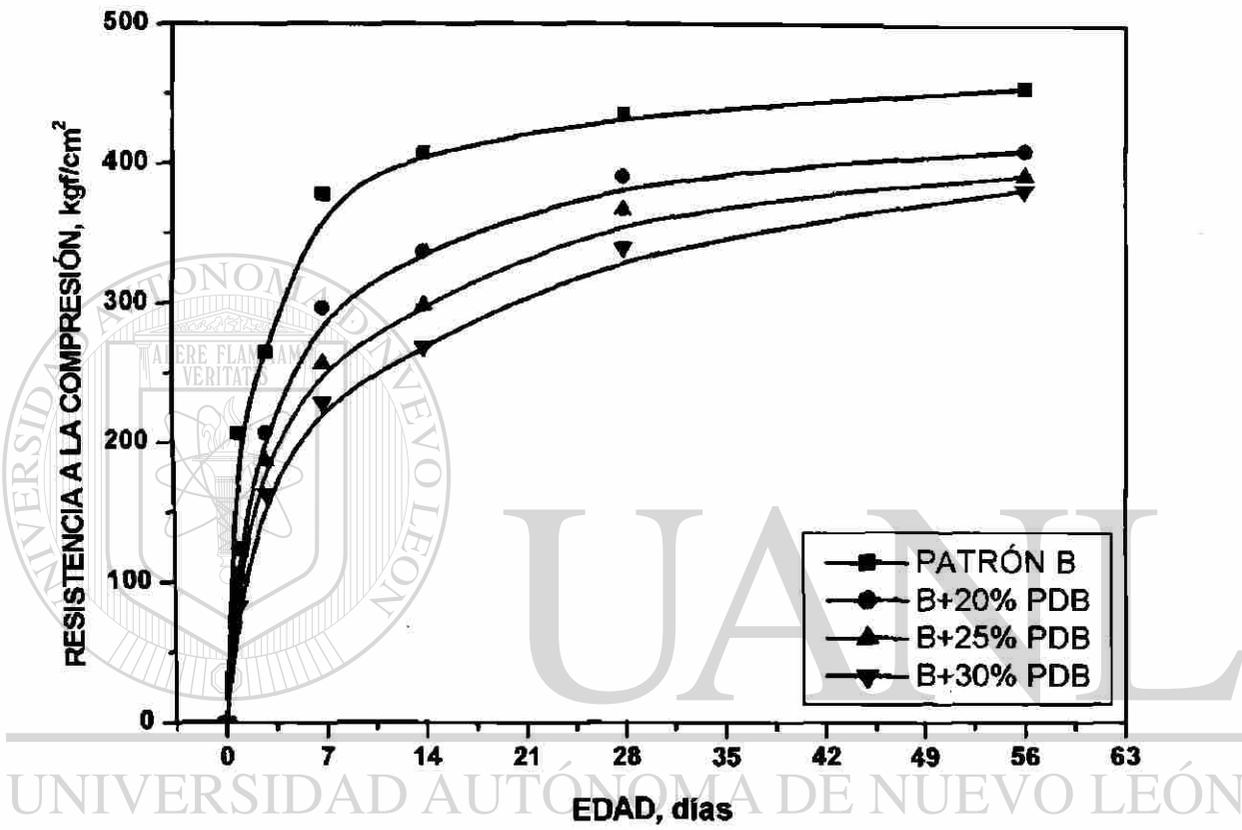
**Gráfica 8. Desarrollo de la Resistencia Mecánica a la Compresión del Cemento Patrón A y las Sustituciones del 20, 25 y 30% por Puzolana PDB.**



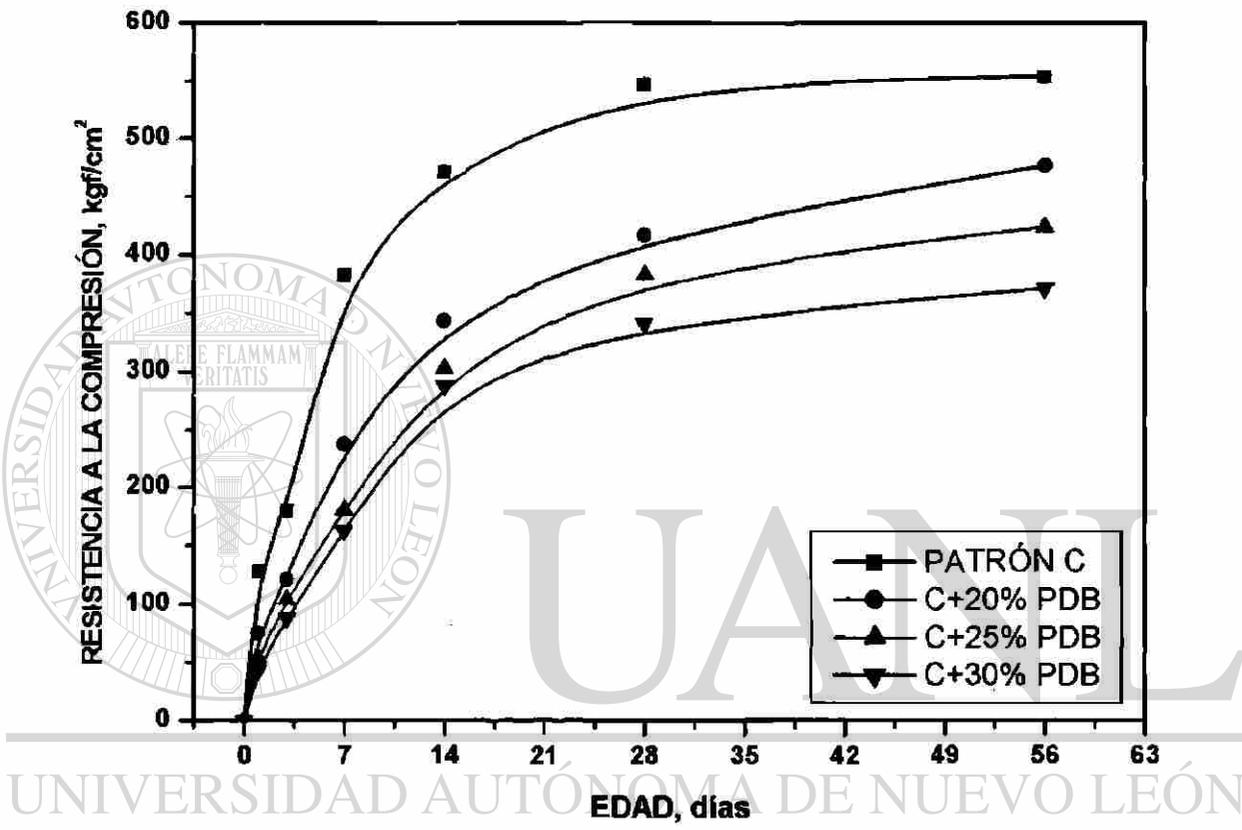
**Gráfica 9. Desarrollo de la Resistencia Mecánica a la Comprensión del Cemento Patrón A y las Sustituciones del 20, 25 y 30% por Puzolana PHCA.**



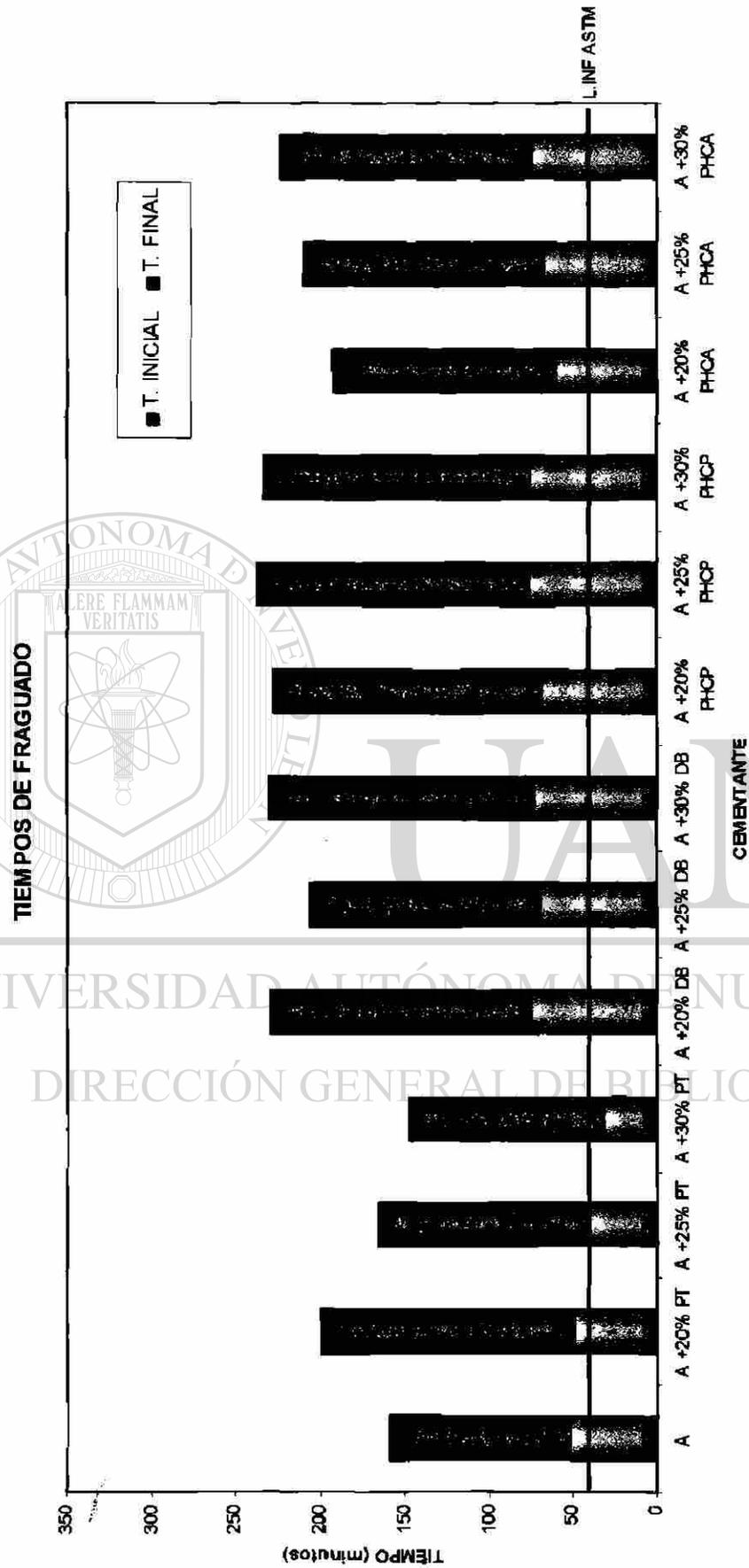
**Gráfica 10. Desarrollo de la Resistencia Mecánica a la Compresión del Cemento Patrón A y las Sustituciones del 20, 25 y 30% por Puzolana PHCP.**



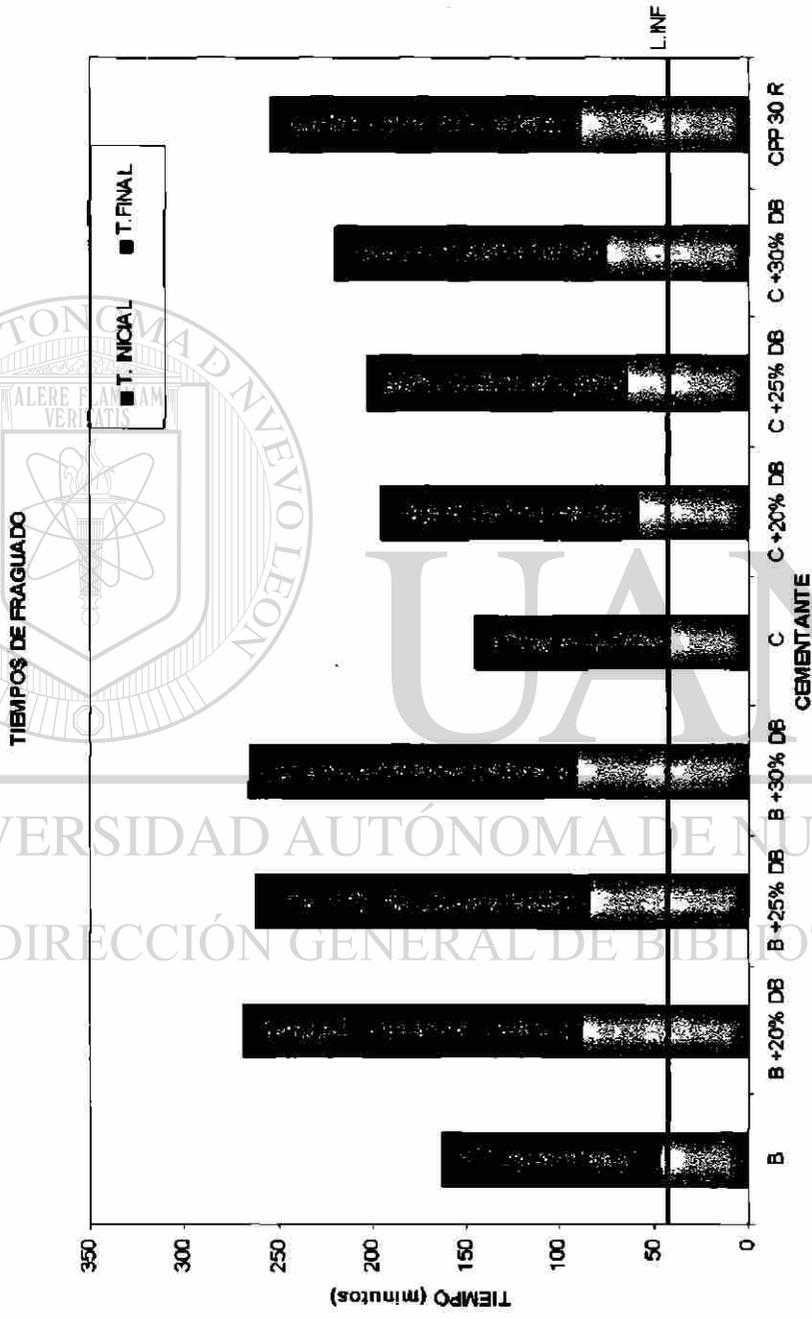
**Gráfica 11. Desarrollo de la Resistencia Mecánica a la Compresión del Cemento Patrón B y las Sustituciones del 20, 25 y 30% por Puzolana PDB.**



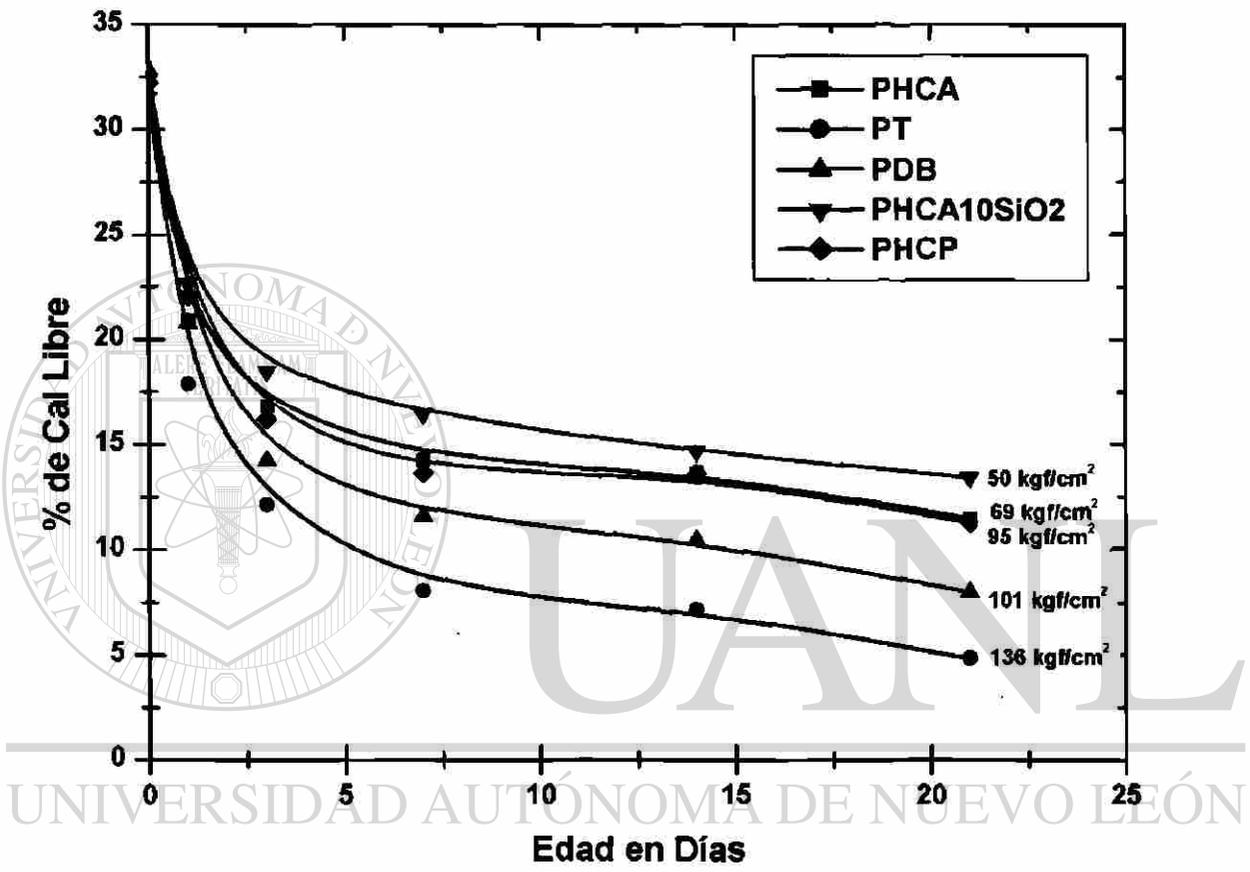
**Gráfica 12. Desarrollo de la Resistencia Mecánica a la Compresión del Cemento Patrón C y las Sustituciones del 20, 25 y 30% por Puzolana PDB.**



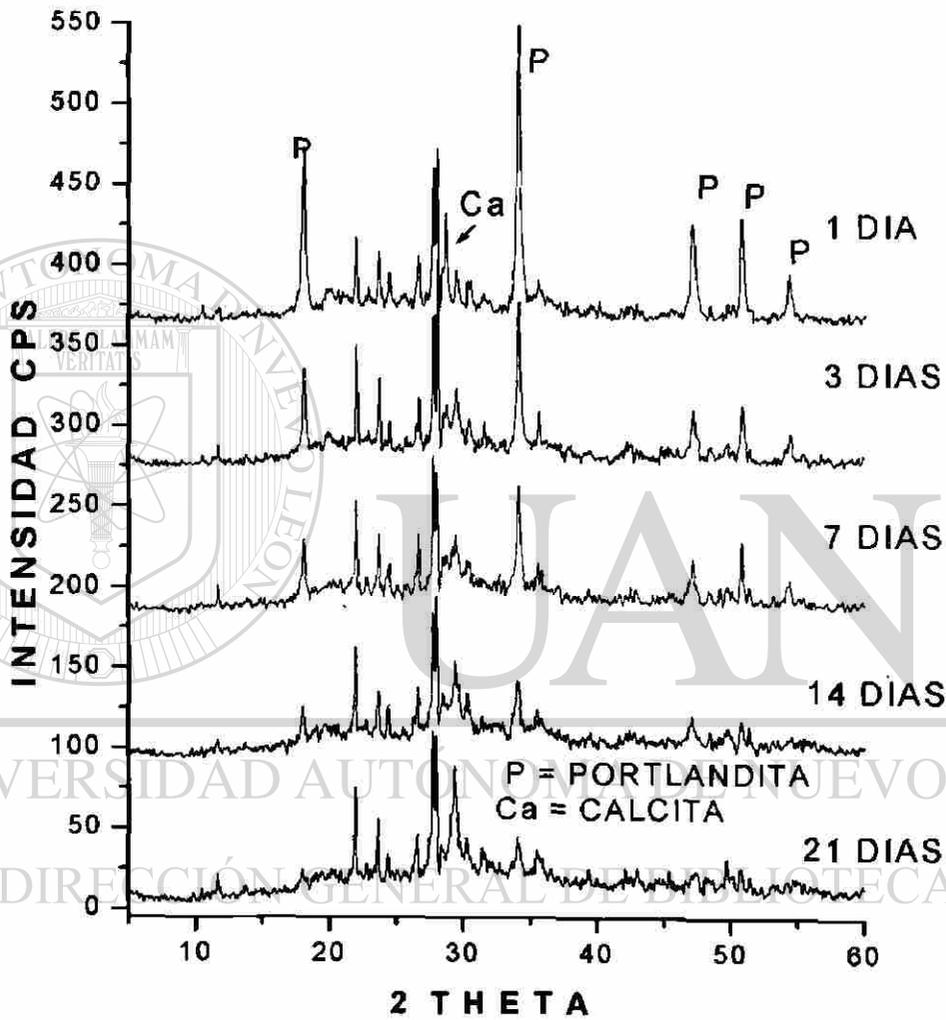
**Gráfica 13. Tiempos de Fraguado obtenidos por medio de las agujas de Vicat y conforme a ASTM C 191-99 para el Cemento Patrón A y cada una de las cuatro puzolanas adicionadas y sus respectivas sustituciones.**



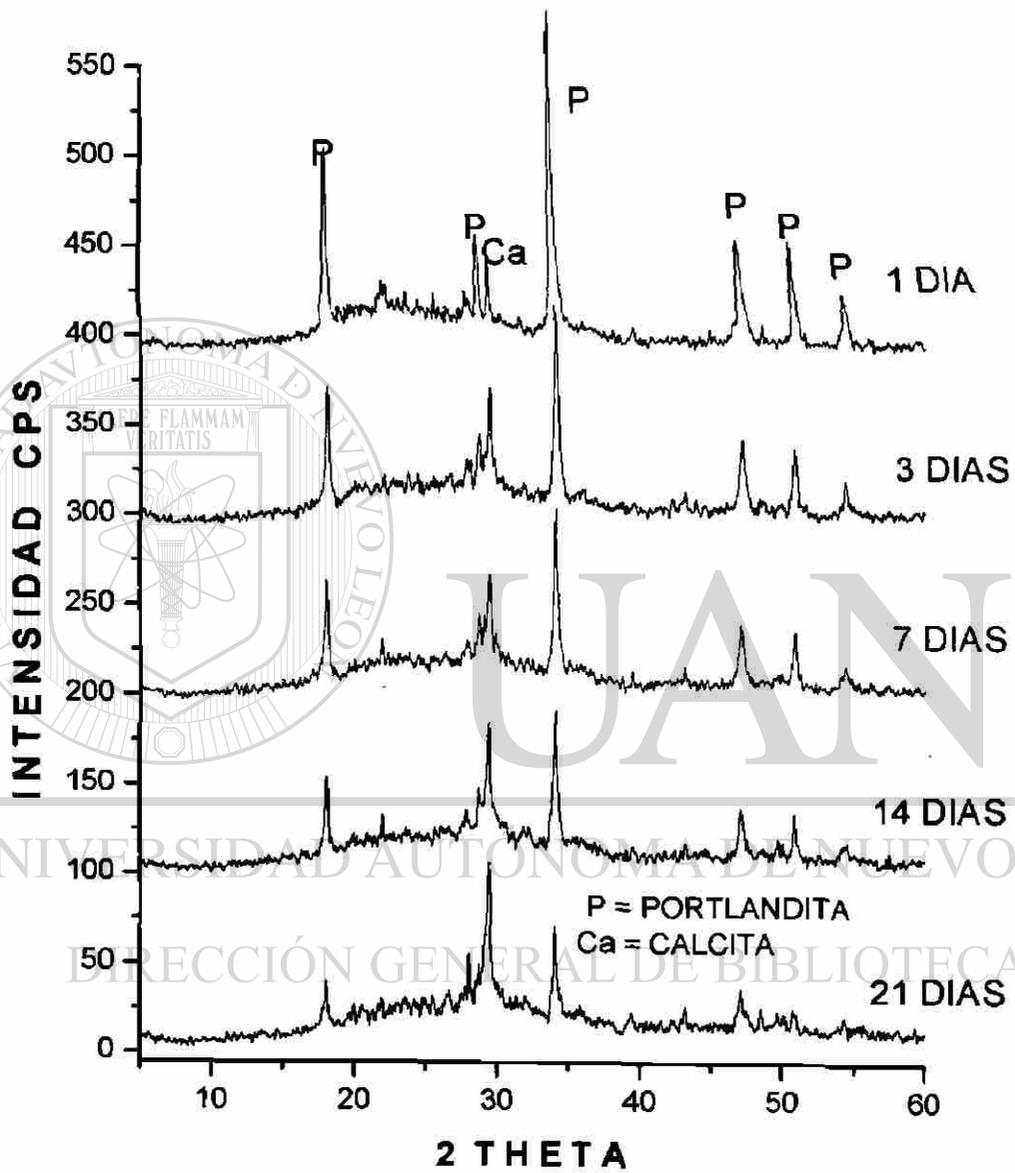
Gráfica 14. Tiempos de Fraguado obtenidos por medio de las agujas de Vicat y conforme a ASTM C 191-99 para los Cementos Patrón B y C y cada sustitución respectiva de la puzolana PDB.



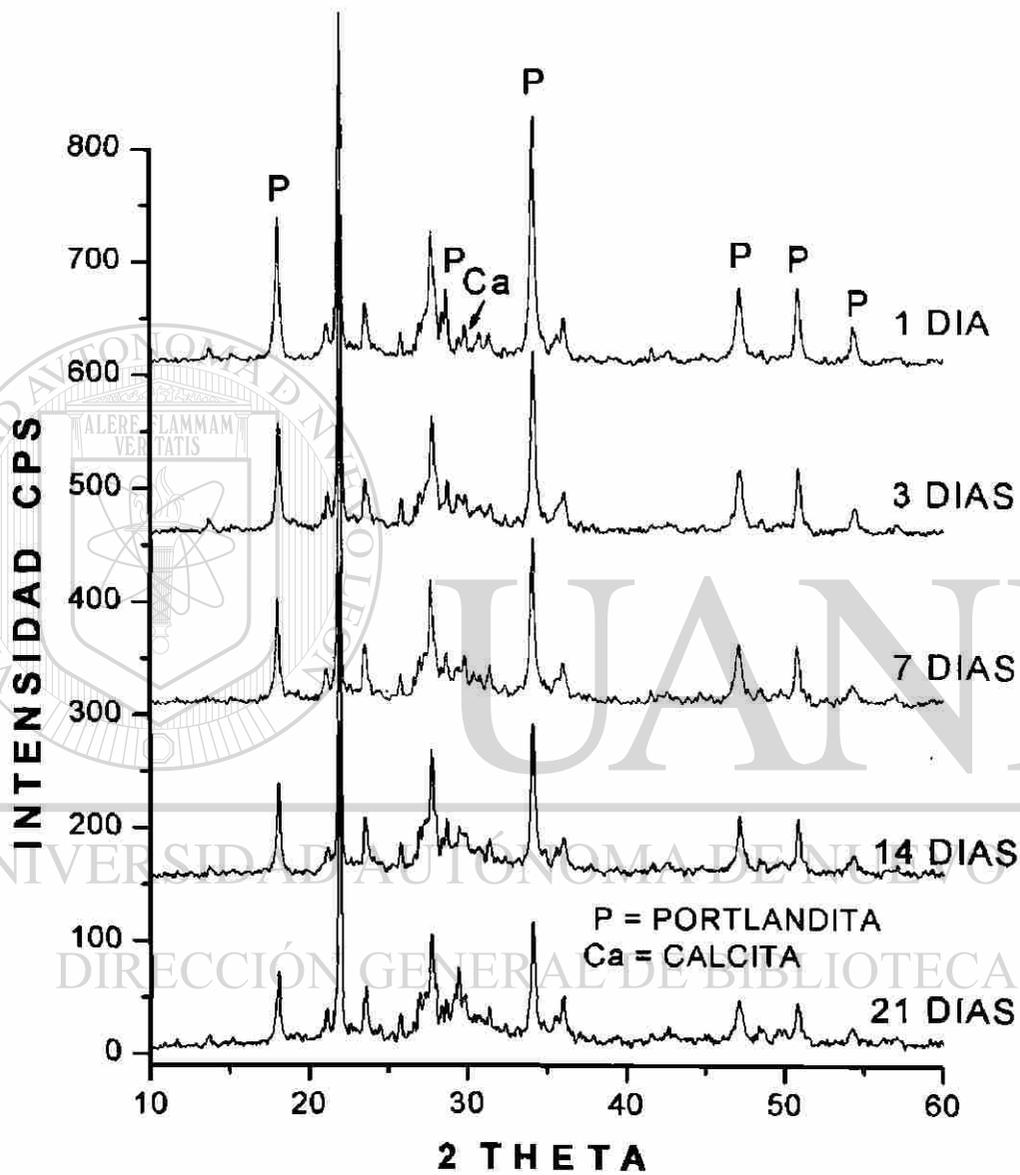
**Gráfica 15. % de Cal Libre en Pastas Cal-puzolanas. Obtenidas por el Método Franke Modificado conforme a ASTM C 311-93 y ASTM C 114-99**



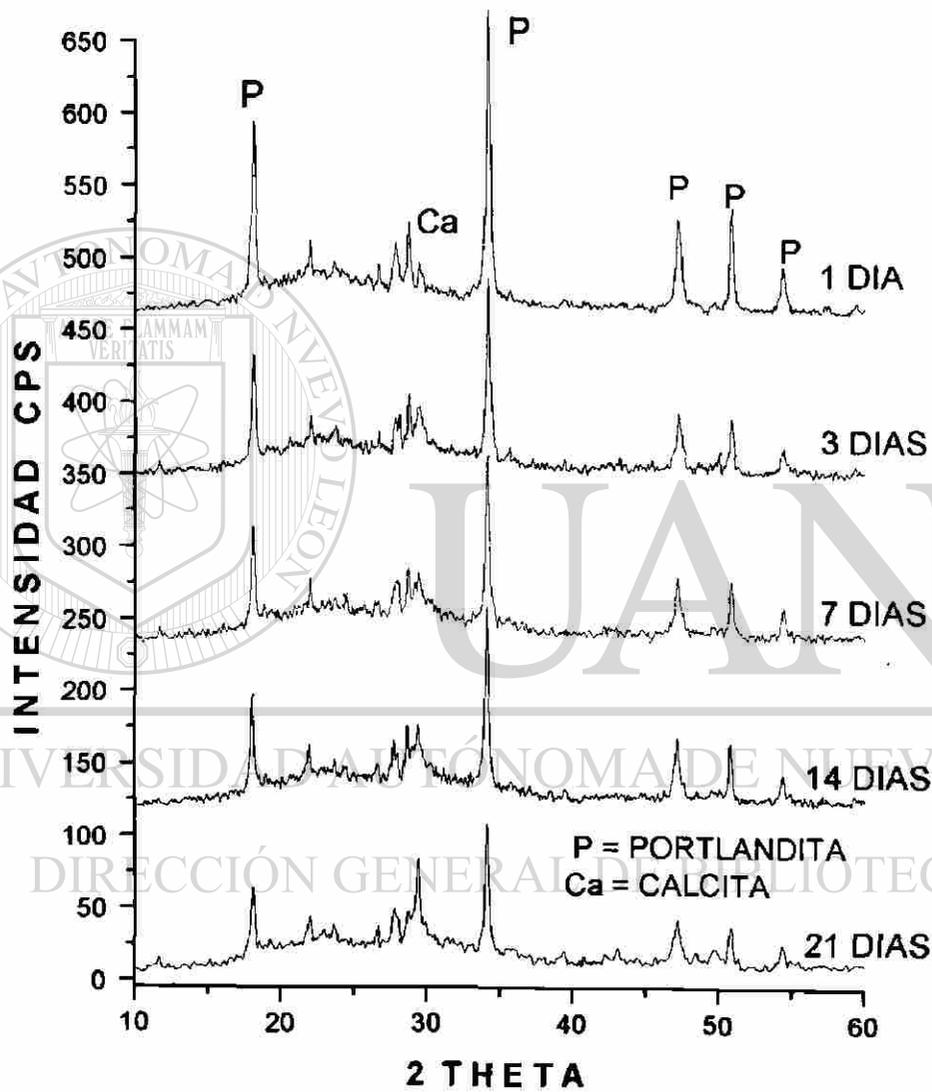
**Gráfica 16. Espectros de DRX de Polvos de Pastas Obtenidas de Mezclas Cal y Pozzolana PT.**



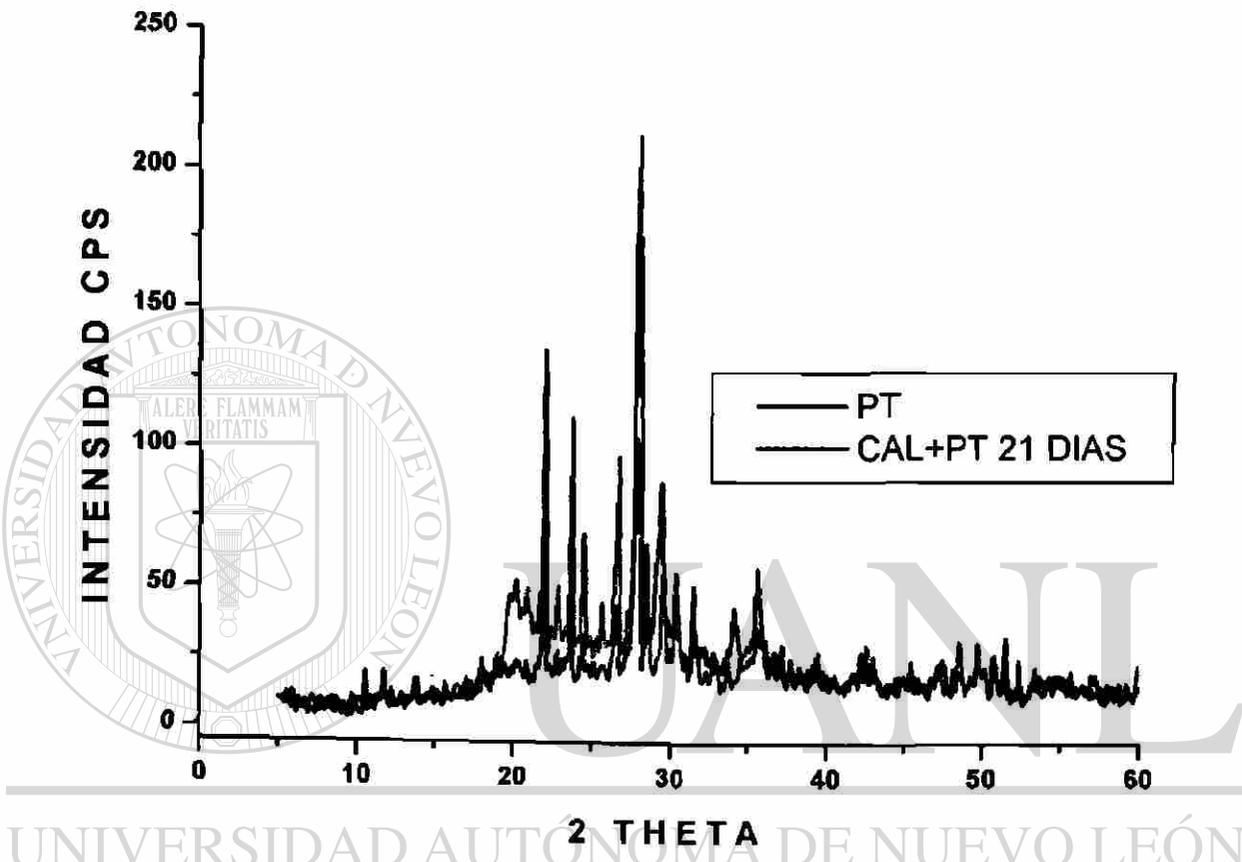
**Gráfica 17. Espectros de DRX de Polvos de Pastas Obtenidas de Mezclas Cal y Puzolana PDB.**



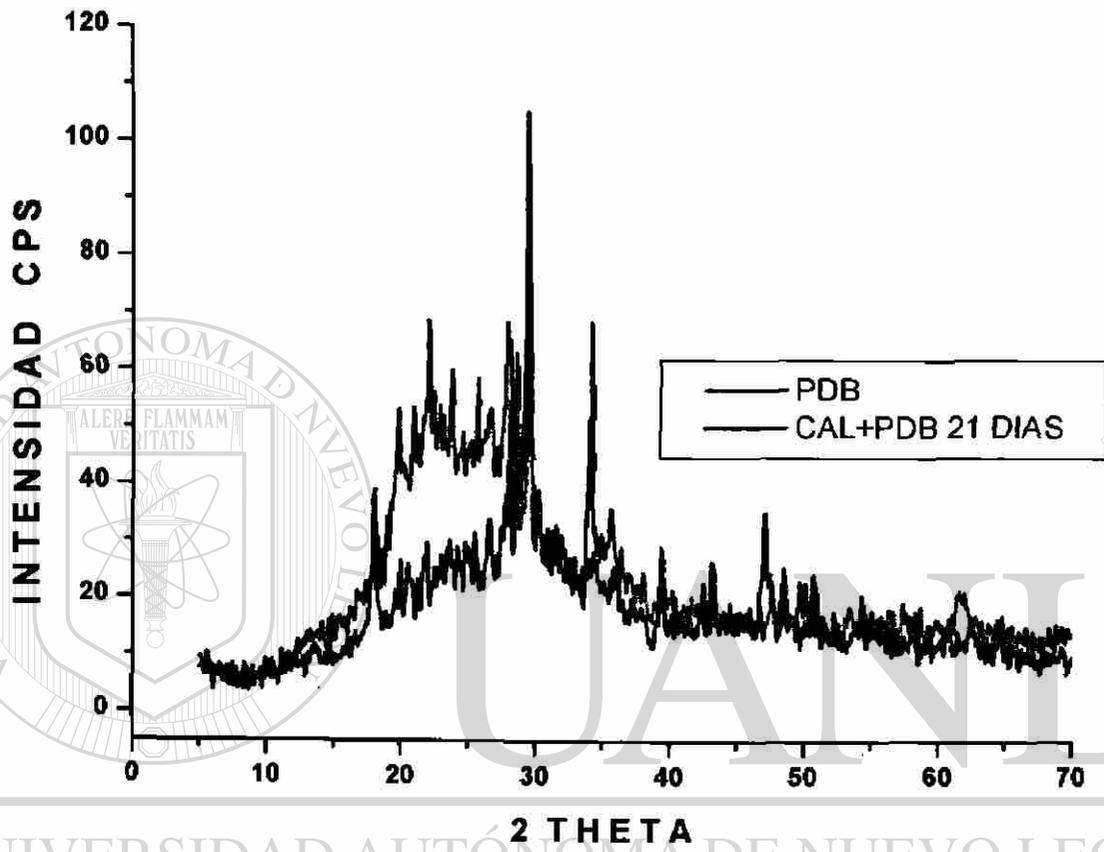
**Gráfica 18. Espectros de DRX de Polvos de Pastas Obtenidas de Mezclas Cal y Puzolana PHCA.**



**Gráfica 19. Espectros de DRX de Polvos de Pastas Obtenidas de Mezclas Cal y Puzolana PHCP.**



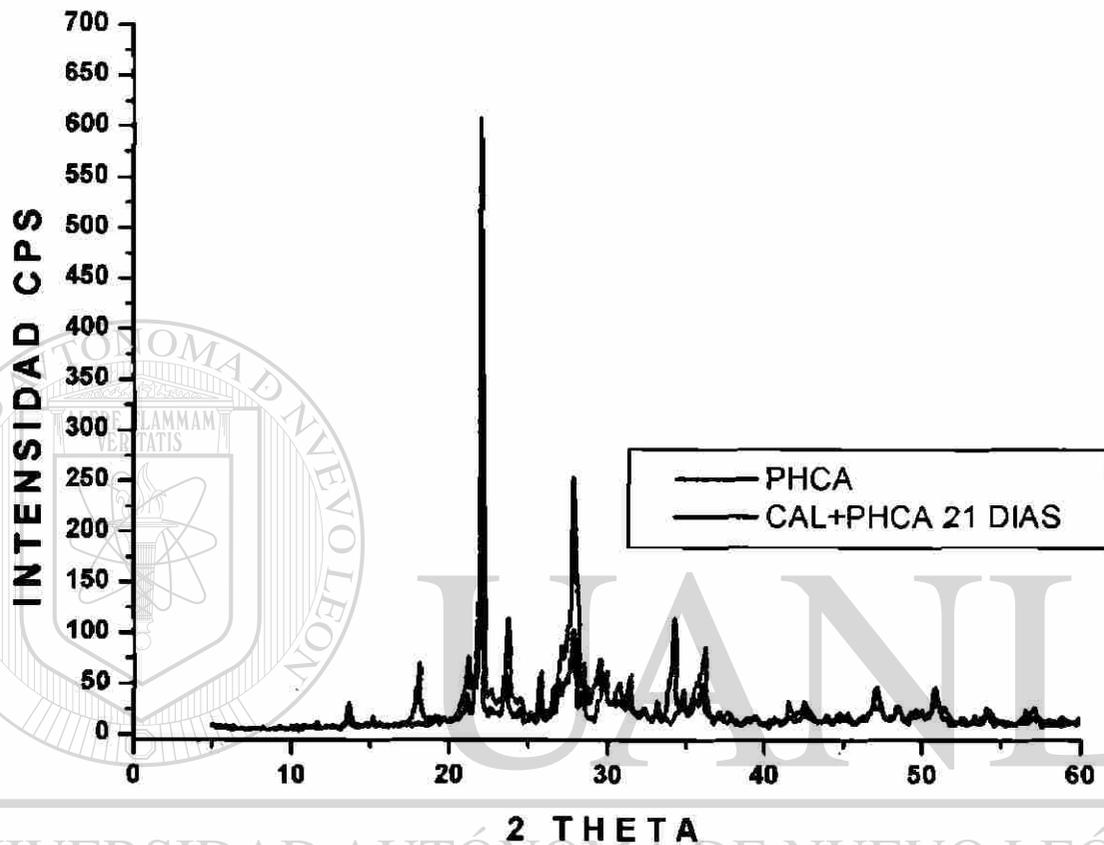
**Gráfica 20. Definición cualitativa de zonas de consumo de las fases reactivas de la puzolana PT por medio de las diferencias entre los espectros de DRX de la puzolana y los polvos de cal - puzolana curados 21 días.**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

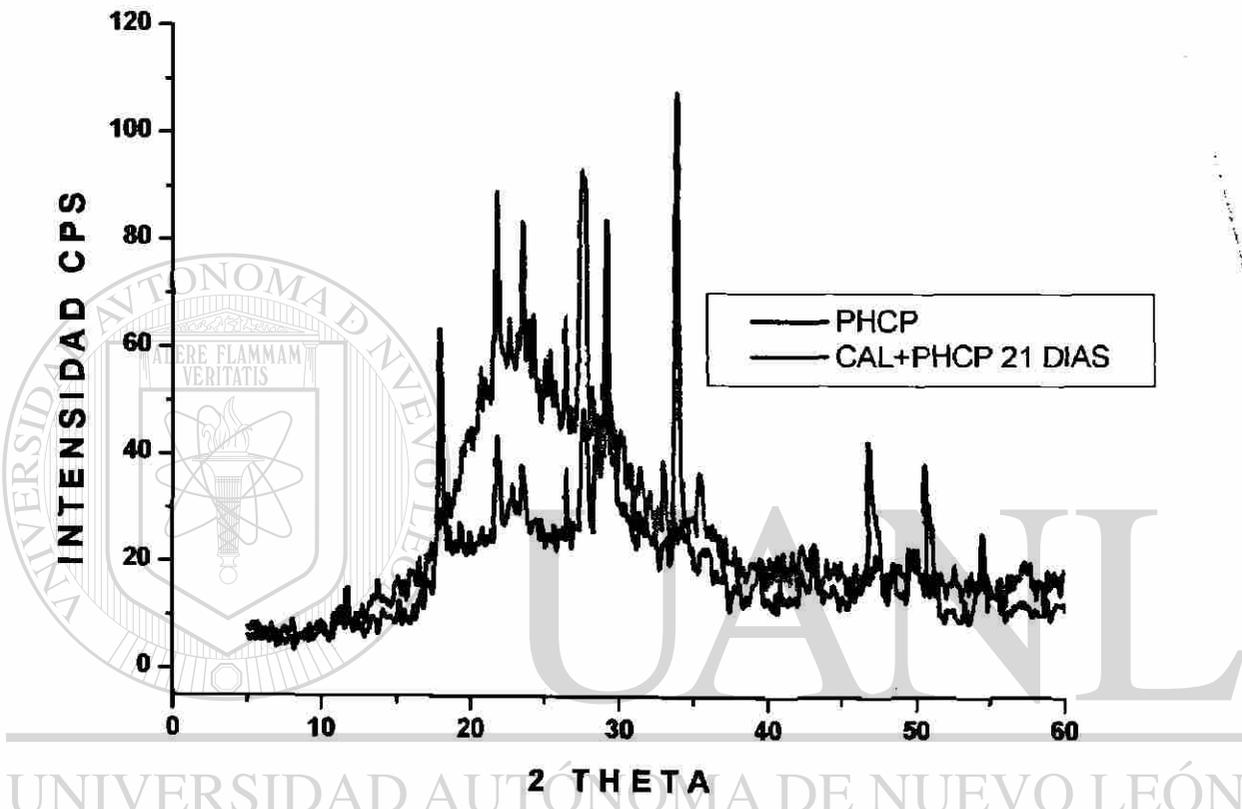
**Gráfica 21. Definición cualitativa de zonas de consumo de las fases reactivas de la puzolana PDB por medio de las diferencias entre los espectros de DRX de la puzolana y los polvos de cal - puzolana curados 21 días.**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

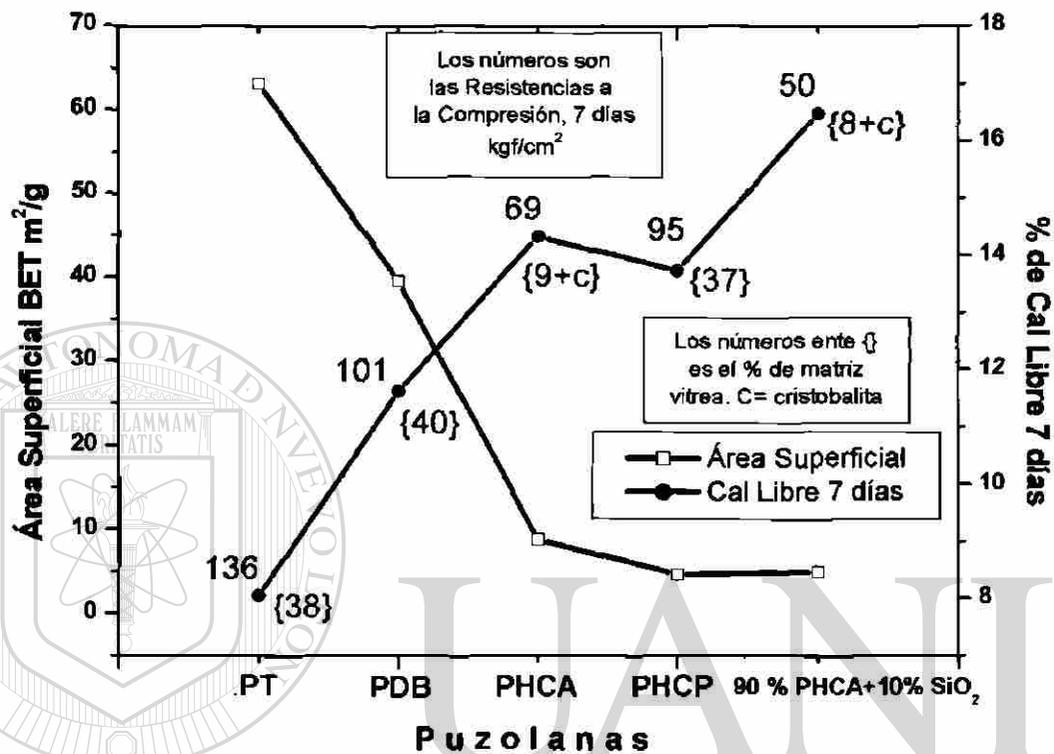
**Gráfica 22. Definición cualitativa de zonas de consumo de las fases reactivas de la puzolana PHCA por medio de las diferencias entre los espectros de DRX de la puzolana y los polvos de cal - puzolana curados 21 días.**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Gráfica 23. Definición cualitativa de zonas de consumo de las fases reactivas de la puzolana PHCP por medio de las diferencias entre los espectros de DRX de la puzolana y los polvos de cal - puzolana curados 21 días.**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**Gráfica 24. Relación entre al Área Superficial y la Actividad Puzolánica con Cal de las Puzolanas.**

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



# Anexo de Imágenes

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**Imagen 1.-** Triturador de quijadas, marca BICO con motor de 5 H. P. Utilizada en la molienda de los materiales.



**Imagen 2.-** Pulverizador, marca BICO con motor de 3 H.P.



**Imagen 3.-** Molino de bolas con moto – reductor. Se utilizaron de 4 a 6 kg de muestra por molienda.



**Imagen 4.-** Cuarteador utilizado para obtener las muestras representativas de cada uno de los materiales.



**Imagen 5.-** Homogenizador Leeson modelo M6017FC1F 0.5 H.P. Se utilizaron como máximo 4 kg de material por cápsula.



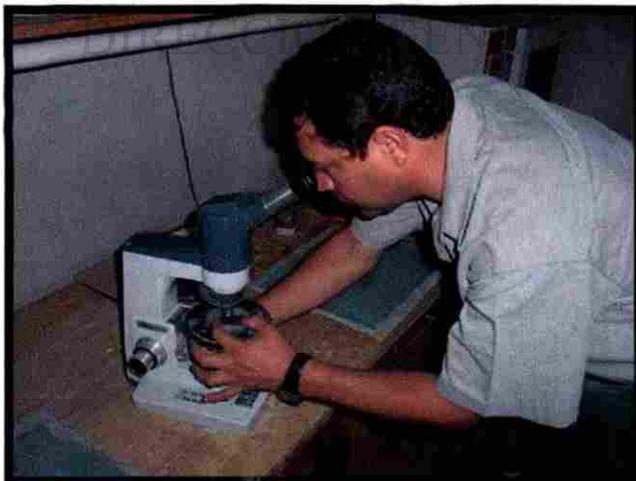
**Imagen 6.-** Equipo de FRX marca Broker AXS utilizado para la determinación del análisis químico de los materiales.



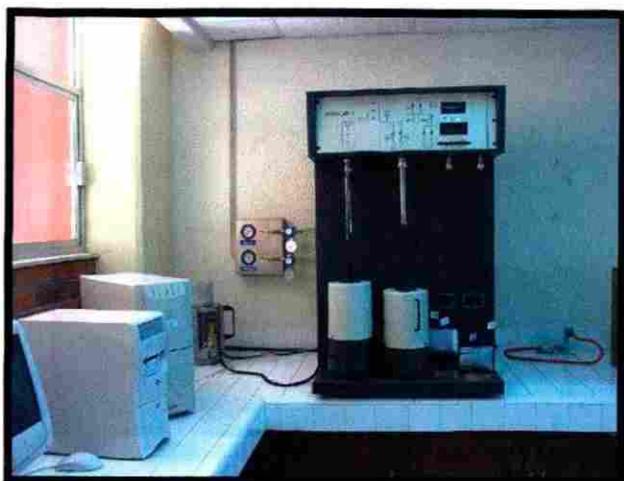
**Imagen 7.-** Perlicadora utilizada para fabricar las pastillas de vidrio requeridas en la determinación del análisis químico.



**Imagen 8.-** Equipo de DRX marca Siemens 5000 utilizado en la determinación de las fases minerales.



**Imagen 9.-** Se utilizaron secciones delgadas y la microscopía óptica para la descripción petrográfica de las puzolanas.



**Imagen 10.-** Equipo de adsorción de nitrógeno utilizado para determinar área superficial de los materiales.



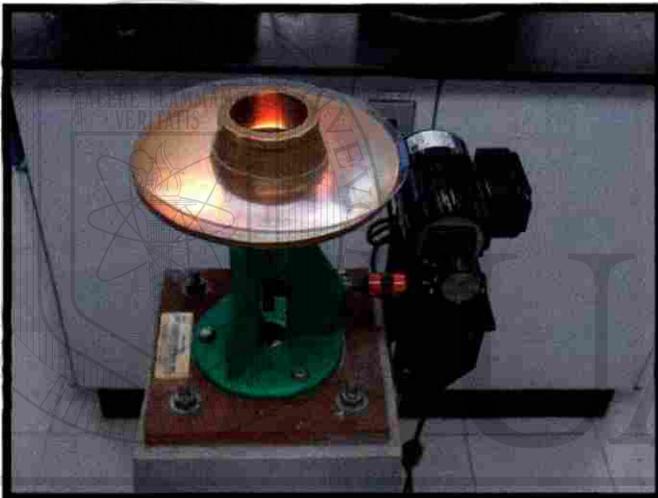
**Imagen 11.-** Equipo utilizado para la determinación de la cal libre por el método Franke.



**Imagen 12.-** Microscopio electrónico de barrido utilizado para comparar las morfologías de las puzolanas.



**Imagen 13.-** Mezcladora estándar utilizada para fabricar pastas y morteros.



**Imagen 14.-** Mesa y equipo utilizado para determinar la fluidez de morteros.



**Imagen 15.-** Cámara de curado estándar en la cual controlamos temperatura y humedad.



**Imagen 16.-** Pila de curado con temperatura controlada y recirculación de agua.



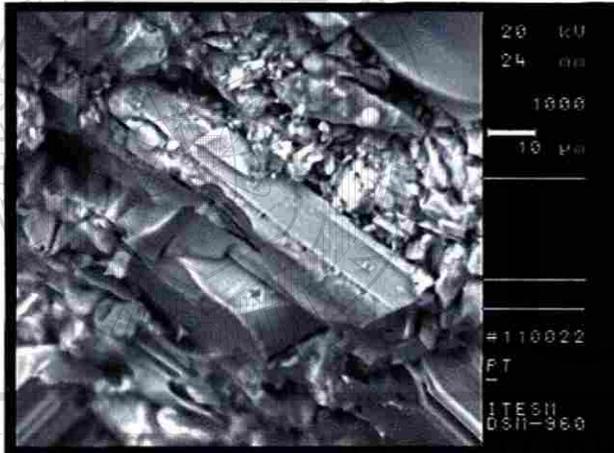
**Imagen 17.-** Equipo Blaine para determinar el área superficial por medio de la permeabilidad al aire.



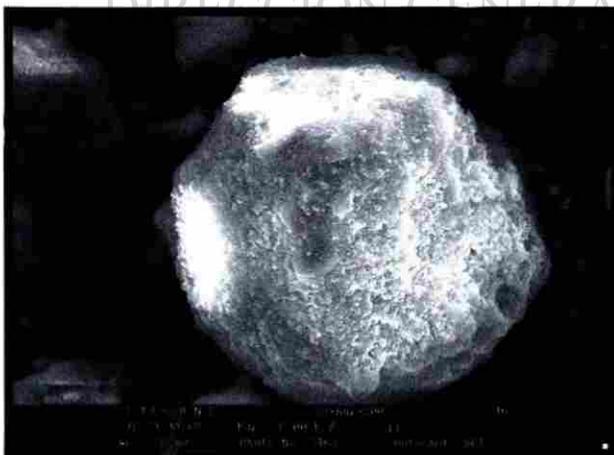
**Imagen 18.-** Cámara de curado requerida para pastas y morteros de cal – puzolana (55° C), con recirculación de agua.



**Imagen 19.-** Material en greña de puzolana PT.



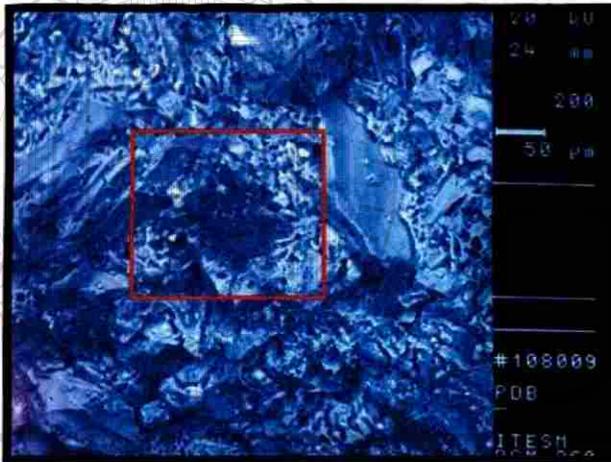
**Imagen 20.-** Material en greña de puzolana PT, clasificado como conglomerado heterogéneo poroso presentando fallas concoidales debido al vidrio de alta relación sílice/alúmina.



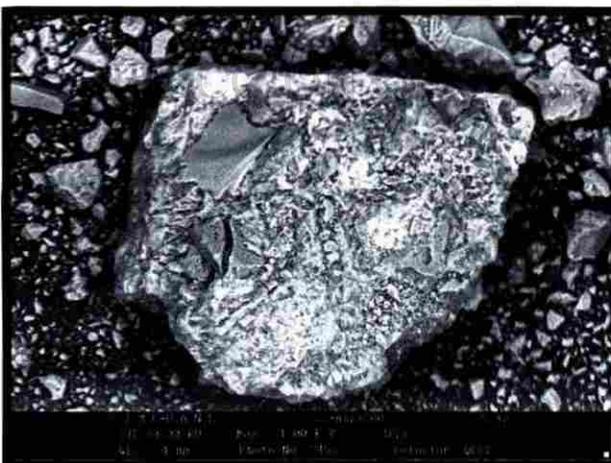
**Imagen 21.-** Morfología de la puzolana PT resultante de la molienda en molino de bolas. Este material es considerado como toba volcánica.



**Imagen 22.-** Material en greña de puzolana PDB, extraído con broca de 37 mm de diámetro.



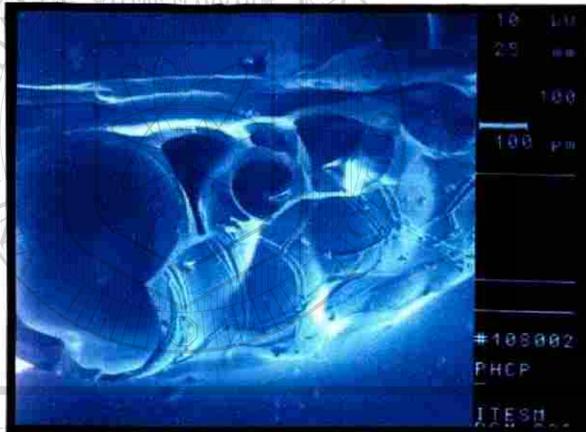
**Imagen 23.-** Morfología de puzolana PDB sin moler, clasificado como un conglomerado masivo compacto no poroso. Se presentan fallas concoidales típicas de los vidrios. En la parte central se presenta material de un tono oscuro que representa el  $\text{CaCO}_3$ .



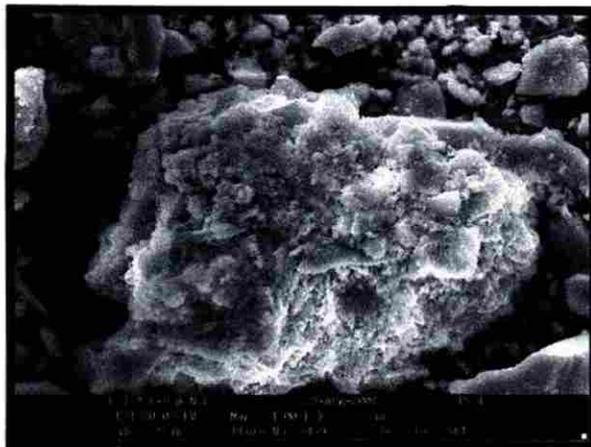
**Imagen 24.-** Morfología de la puzolana PDB resultante de la molienda en molino de bolas. El material presenta textura fluidal típica de las traquidacitas.



**Imagen 25.-** Material en greña de puzolana PHCP.



**Imagen 26.-** Material en greña de puzolana PHCP. Imagen de material pumítico poroso, esto es función del desalojo de gases en la etapa de enfriamiento de este vidrio volcánico.



**Imagen 27.-** Morfología de la puzolana PHCP resultante de la molienda en molino de bolas. El material se presenta como un conglomerado de minerales en una matriz vítrea.



**Imagen 28.-** Material en greña de puzolana PHCA.



**Imagen 29.-** Morfología de la puzolana PHCA resultante de la molienda en molino de bolas. El material se presenta como un conglomerado compacto de minerales, principalmente la cristobalita, dentro de una matriz vítrea.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

# RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Pedro Leobardo Valdez Tamez  
Candidato para el Grado de  
Doctor en Ingeniería de Materiales

Tesis: **DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA EVALUAR MATERIALES NATURALES CON POTENCIAL PUZOLÁNICO PARA SU USO EN CEMENTO.**

Campo de Estudio: **INGENIERÍA DE MATERIALES**

## Biografía:

Datos personales: Nacido en Monterrey, Nuevo León el 29 de junio de 1966, hijo de Leobardo Valdez Cano y Ma. Isidra Tamez de Valdez (†).

Educación: Egresado de la Universidad Autónoma de Nuevo León, con el grado de Ingeniero Civil, en 1992. Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental (Mención Honorífica) en 1998.

Experiencia Profesional: Asistente de investigación en el Departamento de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil, UANL, desde 1991 hasta la fecha. En 1996 impartió el tema: "Agregados para Concreto", dentro del Diplomado en Tecnología del Concreto, en la Facultad de Ingeniería Civil. Es Maestro Ordinario de la Facultad de Ingeniería Civil desde agosto de 1997.

**Ha Participado en Investigaciones** diversas, tales como: "Concreto Compactado con Rodillo Vibratorio", "Porosimetría de Agregados, Propiedades de Diversos Materiales Cementantes", "Durabilidad de diversas Estructuras de Concreto en Varios Estados del País", "Utilización de Subproductos de Química del Rey en la Producción de Materiales de Construcción".

**Ha Asistido a cursos:** "Convención de Primavera del ACI" en Vancouver, Canadá en 1993; "Concreto 94" en Acapulco, Guerrero y "Concreto 95" en México, D. F.; "Curso Teórico-Práctico de Petrografía y Reactividad Alkali-Agregado", en Monterrey, N. L., en 1994; "Convención de Otoño del ACI" en Montreal, Canadá, en 1995; "Técnicas de Análisis para la Caracterización de Materiales en Polvos por Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía de Barrido de Electrones (MBE) y Petrografía (MO), CENAM, Querétaro, Qro, en 1995. "Convención de Primavera del ACI" en Houston, Texas, USA, en 1998. ; "Convención de Primavera del ACI" en

San Diego, California, USA, en 2000; "Convención de Otoño del ACI" en Toronto, Canadá, en 2000.

**Ha sido Ponente las Conferencias:** "La Porosimetría en el Concreto", Semana de la Investigación, CONACYT, Facultad de Ingeniería Civil, en 1993; "Durabilidad del Concreto y la Porosimetría – Curso de Control y Verificación de la Calidad del Cemento Hidráulico", Facultad de Ingeniería Civil, en 1993; "Reacción Álcali-Agregado - Efecto en la Durabilidad", VIII Semana de la Investigación Científica, en la Facultad de Ingeniería Civil, en 1997; "Concurso de Alta Resistencia entre Alumnos que Cursan la Materia de Tecnología del Concreto y Laboratorio" en el 5º Simposio Nacional sobre la Enseñanza del Concreto, en "Concreto 97" de Guadalajara, Jalisco. "Materiales componentes del Concreto" Programa para Supervisores en Obras de Concreto del ACI, Monterrey en mayo de 2001 y septiembre de 2002.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

