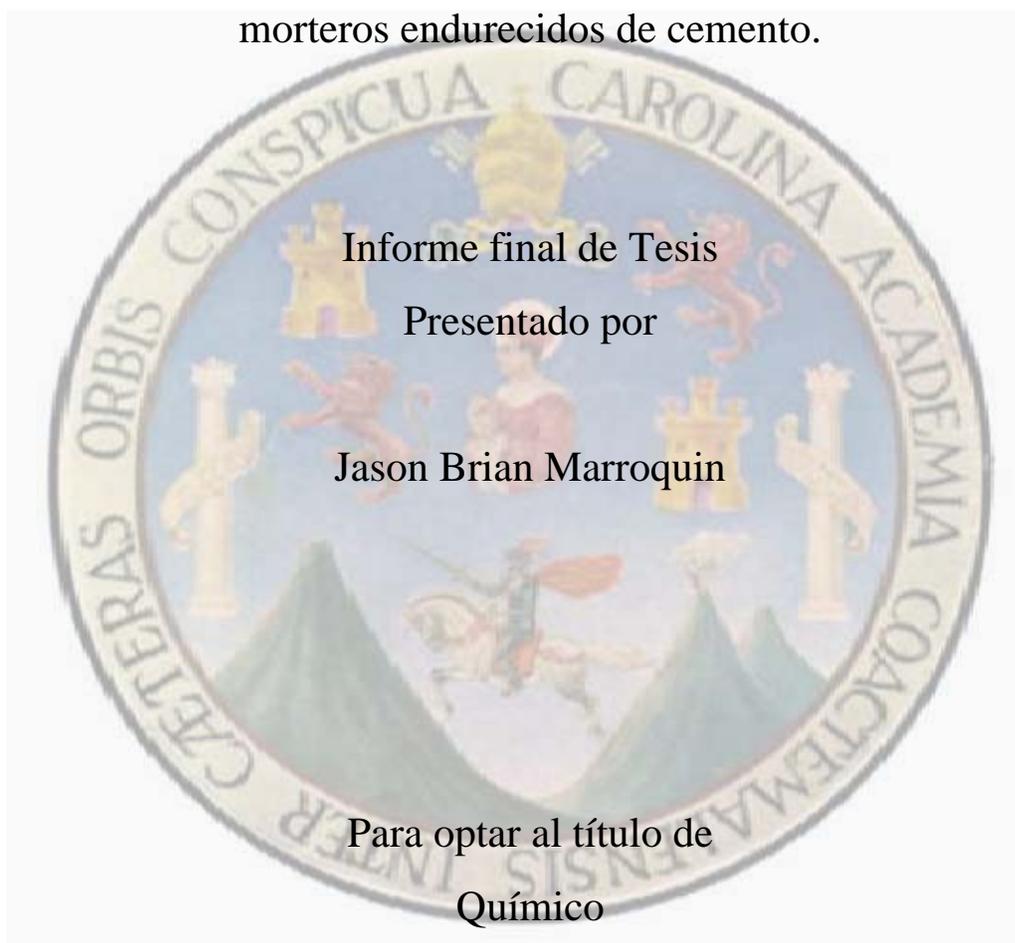


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA

Efecto de la activación química, con un aditivo, de las puzolanas en
morteros endurecidos de cemento.



Informe final de Tesis
Presentado por
Jason Brian Marroquin

Para optar al título de
Químico

Guatemala, Abril 2008

I. ÍNDICE.

	PÁG.
1. RESUMEN.	1
2. INTRODUCCIÓN.	2
3. ANTECEDENTES.	4
4. JUSTIFICACIÓN.	22
5. OBJETIVOS.	24
6. HIPÓTESIS.	25
7. MATERIALES Y MÉTODOS.	26
8. RESULTADOS.	39
9. DISCUSIÓN.	46
10. CONCLUSIONES.	51
11. RECOMENDACIONES.	52
12. REFERENCIAS.	53
13. ANEXOS.	58

1. RESUMEN

La posibilidad de que una puzolana reaccione en presencia de un aditivo varía notablemente en dependencia de un gran número de factores, por lo tanto, es muy importante evaluar qué efecto tendrá sobre la actividad hidráulica en morteros endurecidos de cemento. Por ende es importante establecer una relación entre los porcentajes de actividad hidráulica manifestados con la cantidad de aditivo alcalino hidratado $MO_x(OH)_n$ agregado.

En este estudio se caracterizó el material puzolánico determinando su composición química por medio de fluorescencia de rayos X y su composición granulométrica por vía láser con un aparato CILAS.

La muestra constó de morteros endurecidos de cemento Pórtland, los cuales tenían diferentes porcentajes de aditivo (0, 0.5, 1.0 y 1.5%) con respecto de la masa de material puzolánico natural utilizado. Esos morteros a su vez contenían un 35% de sustitución, en volumen, de cemento por material puzolánico. Se realizaron 4 réplicas de muestreo para obtener un nivel de confianza de 95%.

De la metodología anteriormente mencionada resultó que la actividad hidráulica, a los veintiocho días de curado, apareció como una variable que es directamente proporcional al porcentaje de sustitución con aditivo, consecuentemente se manifestó un comportamiento lineal entre ambas propiedades ($r^2 = 0.96$) descrita por la ecuación $y = 8.3544x + 73.57$, donde el análisis de varianza dio la significancia estadística con un valor P de 0.0226.

Esto quiere decir que la actividad hidráulica aumentó como consecuencia del aditivo agregado, implicando que este activó químicamente a la puzolana debido a que aumentó la hidraulicidad de este material. Por lo tanto se estableció que conforme aumenta el porcentaje de aditivo, aumenta la actividad hidráulica de la puzolana a los veintiocho días de curado.

2. INTRODUCCIÓN

La industria del cemento es particularmente susceptible a las materias primas, pues de ellas depende el tipo y características de cemento producido, también influye la posibilidad de optimización del proceso de fabricación del mismo. La diversidad de aplicaciones que tiene el cemento en la actualidad hace que sea necesario elaborar productos de diferentes características, obedeciendo a las distintas necesidades de resistencia mecánica y química, color, tiempos de fraguado, costos, entre otras. Para lograrlo se requiere utilizar, en su elaboración, sustancias naturales o sintéticas que suministren al cemento las propiedades requeridas. Esta función la cumplen los llamados aditivos.

Dentro de los aditivos se encuentran las puzolanas. Es conocida la importancia del uso de las puzolanas como adiciones activas al Cemento Pórtland Ordinario formando los llamados “cementos mezclados”. Las puzolanas en combinación con compuestos alcalinos forman los llamados aglomerantes de álcali-puzolana. Esto se debe a la capacidad que tienen estos materiales para reaccionar con el hidroxilo, el cual en el caso del cemento es originado durante la hidratación del mismo, teniendo como resultado la formación de compuestos hidráulicos estables. La reacción puzolánica modifica algunas propiedades del cemento y el concreto resultante. Entre estas se encuentra el aumento en la durabilidad de este, manifestada en: un aumento en la impermeabilidad; aumenta la resistencia al ataque de sulfatos (1); facilita el manejo durante su utilización; aumenta la resistencia mecánica a envejecimiento; reduce la reacción álcali-agregado (2).

La evaluación de la actividad puzolánica de un material ha motivado el desarrollo de numerosos métodos, esta diversidad se debe a que la reacción puzolana-álcali (o cemento) no es del todo bien comprendida aún. La “puzolanidad” es un término muy complejo debido a la existencia de diferentes mecanismos de la interacción puzolana-OH⁻ y a una variación considerable en la naturaleza de los materiales que muestran esta propiedad. Por lo tanto, en este estudio se pretendió evaluar el efecto de la activación química del material puzolánico, a través de la utilización de morteros endurecidos de cemento Pórtland, los cuales tienen diferentes porcentajes de aditivo alcalino hidratado (0, 0.5, 1.0 y

1.5%) con respecto de la masa de material puzolánico natural utilizado. Estos morteros a su vez tienen un 35% de sustitución, en volumen, de cemento por material puzolánico con el fin de observar su efecto en la activación química del material puzolánico. La activación del material puzolánico se cuantificó por medio de la determinación del Porcentaje de Actividad Hidráulica (%AH), este porcentaje se establece como cociente entre resistencia mecánica a compresión del mortero con puzolana (R_t) y del mortero control sin puzolana (R_0). Este valor proporciona información que indica como se ve afectada la hidraulicidad de un material (en este caso puzolana) reflejando ya sea la producción de materiales hidráulicos o la capacidad cementante de este.

Se definieron como variables independientes: porcentajes de aditivo y tiempos de curado; se definen como variable dependiente: Porcentaje de Actividad Hidráulica (%AH). Además se realizaron 4 réplicas de muestreo para obtener un nivel de confianza de 95%, se realizó un análisis de regresión, entre las variables, evaluándose estadísticamente por medio del coeficiente de determinación (r^2). Por último se estableció una correlación simple entre Porcentaje de Actividad Hidráulica Vrs. % de aditivo a los 28 días de curado (3).

3. ANTECEDENTES

3.1. CEMENTO PORTLAND.

El cemento consta de material polvoriento, que cuando se mezcla con agua forma una pasta, se endurece y permite unir cuerpos sólidos. Los cementos son materiales hidráulicos, esto quiere decir que dependen de la reacción con agua en vez de aire para el desarrollo de dureza, la reacción química producida al agregar agua se le llama hidratación. El nombre de cemento Pórtland es característico de un tipo de cemento hidráulico de silicatos calcinados de calcio, en su mayoría.(4) En 1824 el inglés José Aspdin calcinó una mezcla de cal apagada y arcilla, obtuvo un producto hidráulico, sin cal en libertad, al que llamó cemento Pórtland porque una vez endurecido, se asemeja mucho en color y dureza a la piedra de construcción de Pórtland.(4)

En la fabricación del cemento Pórtland se emplean distintas materias primas: calizas, creta, margas y materiales con alto contenido de sílice como areniscas, arcillas, esquistos arcillosos (rocas de composición poco definida representadas por hojas o láminas delgadas). Los materiales crudos (harina cruda) deben mezclarse entre sí de modo que las proporciones de óxido de calcio, sílice, aluminio, y óxido férrico deben mantenerse cerca de ciertos límites definidos, y otros constituyentes, como el magnesio, y los álcalis, no deben exceder ciertos límites. Los materiales deben ser triturados y molidos hasta alcanzar una fineza cercana a la del cemento (5). Estos materiales luego son calentados, generalmente con rotación, a altas temperaturas (aprox. 1500° C). El calentamiento primero libera agua y dióxido de carbono (CO₂) y luego causa otras reacciones entre los sólidos, entre éstas la fundición parcial de los minerales. El enfriamiento resulta en *clinker*.

El clinker es triturado para uso en la producción de cemento. La manufactura de cemento comercial incorpora una variedad de minerales, entre estos: óxido de calcio, sílica, alúmina, óxido de hierro, óxido de magnesio, dióxido de titanio y muchos otros (5). De estos, tres son los más importantes para el cemento como producto final: óxido de calcio(C), sílica(S) y alúmina(A).

El cemento de alta calidad requiere, en su clinker, de la presencia de dos componentes: silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) y silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$). De estos dos el silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) es el más deseado. Estos materiales reaccionan vigorosamente con agua para producir la pasta cementosa en el producto final (hidratación del cemento).

3.1.1 HIDRATACIÓN DEL CEMENTO.

El clinker Pórtland es el principal componente del cemento Pórtland y presenta los siguientes compuestos básicos:

- Silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)
- Silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)
- Aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$)
- Ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)

Para simplificar la referencia a varios de los componentes del cemento se utilizarán las siguientes abreviaturas, las cuales son de uso común en la industria cementera.

Tabla No. 1 Componentes del cemento, nombres, composición y abreviaturas.

Nombre	Composición	Formula empírica	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Ca_3SiO_5	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Ca_2SiO_4	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	C_4AF
Hidrato de silicato cálcico	$(\text{CaO})_x\cdot\text{SiO}_2\cdot y\text{H}_2\text{O}$	variable	SCH

Los silicatos (C_3S y C_2S) son los componentes principales ya que suman alrededor del 80 % de los compuestos y son los responsables del desarrollo de resistencia del cemento Pórtland. Mientras que el C_3S actúa sobre el desarrollo de resistencia temprana hasta los 28 días, el C_2S presenta una hidratación algo diferida y actúa sobre la resistencia final. El C_3A que se encuentra en pequeñas cantidades actúa sobre el tiempo de fraguado, la resistencia a primeras horas del hormigón y su presencia hace vulnerable al hormigón a la acción de los sulfatos. El C_4AF se considera casi un subproducto de la fabricación de clinker y actúa principalmente sobre la coloración del cemento y aporta cierta vulnerabilidad a los sulfatos.

Si se esquematiza la hidratación de los silicatos (Ver Figura 1):



C_nS: silicatos de calcio

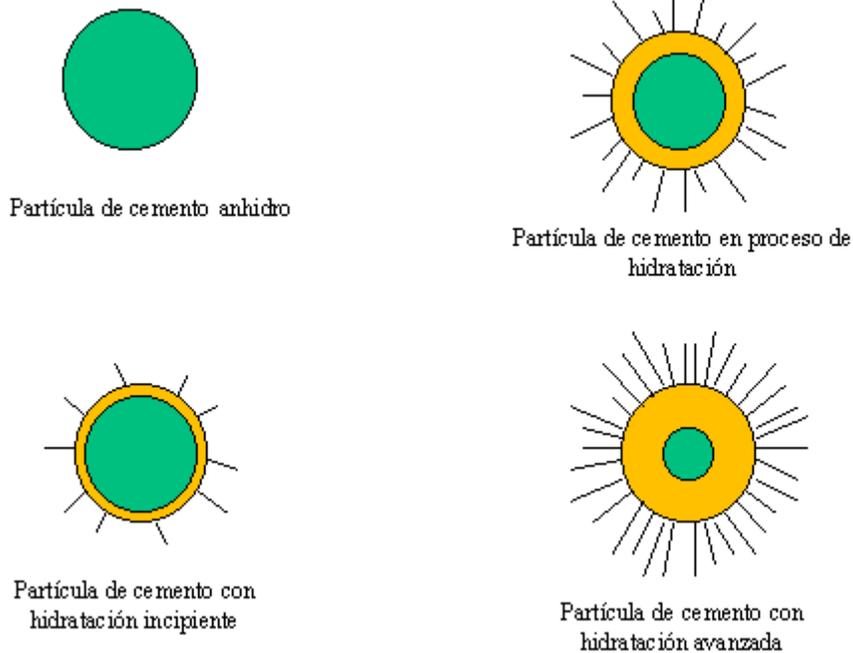
H₂O : agua

Gel SCH : silicatos de calcio hidratados o gel de tobermorita (o gel de cemento)

Ca(OH)₂: hidróxido de calcio

Mientras el gel SCH es el principal responsable del desarrollo de resistencia y de la durabilidad del hormigón, el Ca(OH)₂ (hidróxido de calcio) es muy poco resistente desde el punto de vista mecánico, es vulnerable a la presencia de aguas duras, sulfatos y otros agentes; pero resulta fundamental en la protección de las armaduras frente a la corrosión debido al alto nivel alcalino que aporta al hormigón (aproximadamente un pH = 12,5).

Figura No.1



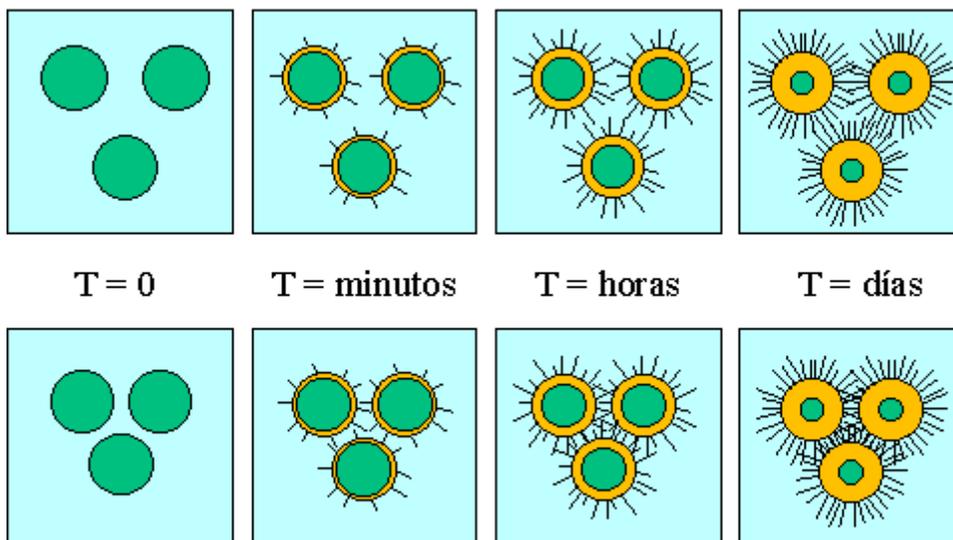
Progreso de la hidratación de una partícula de cemento

Fuente: [http://www.ArqCon.com.ar/ArqCon Arquitectura y Construcción.htm](http://www.ArqCon.com.ar/ArqCon%20Arquitectura%20y%20Construcci%C3%B3n.htm).

Como puede observarse en la figura No.1, existe un crecimiento de los cristales SCH (compuestos silico-calcáreos hidratados). Como se mencionó anteriormente, estos compuestos SCH son los responsables de la evolución de resistencia de la pasta de cemento y, consecuentemente, del hormigón. En la figura No.2 puede observarse la resistencia de la pasta depende del grado de interrelación entre los productos de hidratación de las distintas partículas de cemento. Esto explica bastante, de forma clara, que cuando se utiliza una baja relación agua-cemento(a/c), la interrelación es mucho más estrecha y, consecuentemente, es de esperar que la resistencia sea superior comparado con una pasta que utiliza una alta relación a/c donde las partículas se encuentran más alejadas.

Figura No. 2

Alta a/c



Baja a/c

Influencia de la relación agua/cemento (a/c) sobre la resistencia de la pasta.
Fuente: [http://www.ArqCon.com.ar/ArqCon Arquitectura y Construcción.htm](http://www.ArqCon.com.ar/ArqCon%20Arquitectura%20y%20Construcci%C3%B3n.htm).

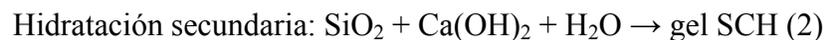
Otra forma de ver este fenómeno, es el esquema de la figura No.3 (Ver Anexos) donde puede observarse que cuando más baja es la relación a/c, más bajo será el volumen de poros de la pasta, por lo tanto si pensamos que la resistencia del cemento u hormigón sigue las reglas de la resistencia de cualquier material sólido, es de esperar que la misma dependa de la relación entre "vacíos" y "llenos" estableciéndose que cuando mayor sea el

contenido de "lentos" mayor será la resistencia del elemento. Adicionalmente, en la figura se observa que los hormigones de alta relación a/c, no solamente presentan una baja resistencia sino que tienen alta porosidad y, consecuentemente, alta permeabilidad y espacio para la formación de grandes cristales de Ca(OH)_2 (cal) y etringita (fases de aluminoferratos) por lo cual se verá afectada la durabilidad debido a que sustancias agresivas pueden ingresar al hormigón con cierta facilidad disueltas en agua o el aire(7).

3.2. ADICIONES MINERALES EN EL CEMENTO

Las adiciones minerales (diferentes a los aditivos) son compuestos naturales o artificiales que se incorporan al cemento o directamente al hormigón con el objeto de mejorar el comportamiento del cemento u hormigón en estado fresco y/o endurecido. En la figura No.4 (Ver Anexos) se intenta realizar una clasificación de las adiciones minerales utilizadas mundialmente en la industria del cemento y hormigón. Una primera clasificación divide las mismas en activas e inactivas (9).

3.2.1 Activas: Las adiciones activas son aquellas que tienen la capacidad de hidratarse y formar compuestos SCH de manera similar a los formados en la hidratación del clinker Pórtland. A su vez, estas pueden separarse en las que poseen hidraulicidad latente y las puzolánicas. Mientras que las primeras tienen la capacidad de hidratarse por sí mismas en presencia de agua y un agente catalizador, las segundas se hidratan a través de una reacción secundaria donde se combinan con el Ca(OH)_2 formado durante la hidratación primaria, resultando compuestos SCH:



Donde el SiO_2 lo aporta la puzolana y el Ca(OH)_2 es el subproducto generado durante la hidratación primaria. Podrá observarse que durante la hidratación de las puzolanas no hay generación de Ca(OH)_2 por lo cual es de esperar que los cementos u hormigones que poseen estas adiciones presenten mayor resistencia final y durabilidad que

los elaborados con cementos "puros" ya que el Ca(OH)_2 tiene muy baja resistencia estructural.

En el caso de la hidratación de la escoria granulada de alto horno, el agente catalizador es el ambiente alcalino generado durante la hidratación primaria. En forma similar a las puzolanas, durante la hidratación de esta adición mineral solamente se genera gel SCH por lo cual se espera mayor resistencia final y durabilidad:



3.2.2 Inactivas: Las adiciones inactivas, no generan gel SCH aunque suelen tener una influencia positiva sobre la hidratación de las partículas de clinker y las propiedades del hormigón en estado fresco. Una adición inerte, relleno o "Filler" como también se le denomina, es un material agregado al cemento en proporciones que fluctúan entre el 5 y 30% en peso y que no reaccionan químicamente con éste. Un ejemplo de este es el relleno calcáreo (4, 9).

El relleno calcáreo es un mineral compuesto básicamente por carbonato de calcio que, dada su facilidad de molienda, se adiciona al cemento o se muele en forma conjunta con el clinker Pórtland en molino de cemento y ejerce efectos beneficiosos sobre los morteros u hormigones en estado fresco. Adicionalmente, debido a su pequeño tamaño las partículas de relleno calcáreo suelen mejorar la distribución granulométrica del cemento mejorando la resistencia temprana del hormigón (4, 6, 9).

En la figura No.5 (Ver Anexos) se muestra el comportamiento aproximado que presentaría un hormigón elaborado con cemento Pórtland "puro" y utilizando una dosificación similar reemplazando parte del cemento Pórtland "puro" por adiciones minerales. Puede observarse que mientras las adiciones activas se hidratan a partir de las reacciones de hidratación del clinker Pórtland, se obtienen desarrollos un tanto más lentos de resistencia aunque las resistencias finales son mayores debido a una hidratación más completa del material cementicio, en cambio, el uso de adiciones inactivas mejora la

resistencia inicial de los hormigones aunque la resistencia final es menor debido a que se dispone de menor cantidad de partículas "hidrables"(4, 6, 7, 9).

No obstante, este esquema es indicativo y muestra tendencias, ya que los fabricantes de cemento Pórtland conocen el comportamiento de las adiciones que utilizan para elaborar sus cementos, por lo cual puede encontrarse en el mercado cementos con distintos tipos de adiciones se puedan obtener curvas de evolución de resistencia similares a las que se obtendrían utilizando algunos cementos "puros". Esto solamente puede lograrse mediante tecnología de molienda y/o utilizando un clinker de características especiales para la elaboración de cementos adicionados (4, 7).

Como se menciona anteriormente algunos de éstas son relativamente inertes (cuarzo, caliza, arcillas calcinadas, etc.) pero existen otros de marcada e importante actividad química entre los que se encuentran las PUZOLANAS y son éstos el objeto principal de este documento (4, 6).

3.3. PUZOLANAS

3.3.1 ORIGEN DEL TERMINO “PUZOLANA”

Los griegos y romanos, primeros en conocer la cal con sus propiedades cementicias le agregaron materiales naturales que estaban a su alcance, quizás con el objeto de que participasen como áridos (inertes), y como es sabido el suelo donde florecieron estas civilizaciones tiene una importante cobertura de material piroclástico, obteniendo morteros de alta resistencia y mayor durabilidad lo que llevo a que el uso de estos aditivos volcánicos se generalizara, éstos se encontraban principalmente en la localidad de Puzzuoli de donde derivan su nombre.(2, 4, 6)

3.3.2 DEFINICIÓN DE PUZOLANA

Son productos naturales o artificiales, silíceos o sílicoaluminosos que en si mismos poseen poca o ninguna propiedad aglomerante ni actividad hidráulica, pero finamente molidas, a temperaturas ordinarias y en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio formando compuestos que sí tienen propiedades aglomerantes e hidráulicas. Las puzolanas presentan en virtud de su inestabilidad química, reflejo del desorden estructural, alta susceptibilidad de reaccionar con otras sustancias para formar nuevos compuestos más estables, es así como atrapan la cal libre en el clinker. Las puzolanas engloban materiales de diferente naturaleza, por esto cuando se habla de ellas se está haciendo alusión a rocas, suelos, sedimentos o productos artificiales que presentan propiedades puzolánicas (4, 9).

3.3.3 CLASIFICACIÓN DE LAS PUZOLANAS SEGÚN EL ORIGEN

Se clasifican en dos grandes grupos: naturales y artificiales, aunque existe un grupo intermedio constituido por puzolanas naturales que necesitan tratamientos térmicos de activación, con el objeto de aumentar su reactividad.

3.3.3.1 Puzolanas Naturales: Según la ASTM (American Society for Testing and Materials), las puzolanas naturales son materiales sílicos o sílico-aluminosos que por sí solos poseen poco o nulo valor cementante, pero finamente divididos, 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.(10). Se le atribuye la reactividad de estos materiales a la combinación de una estructura pobremente cristalina o vítrea que puede poseer alta área superficial.(11)(12)

Las puzolanas naturales son productos minerales con características en su composición (silico-aluminosos), estructura (estructura imperfecta o amorfa) y textura (grano fino) que los hacen aptos para su uso como aditivos activos en la industria del cemento, entre éstas están:

- Las acumulaciones de cenizas generadas durante las erupciones volcánicas explosivas, que por su alto contenido de materiales vítreos son propensas a sufrir reacciones como las

requeridas para las puzolanas. Más tarde por procesos geológicos de enterramiento estas cenizas se convierten en tobas, las cuales son rocas volcánicas bastante porosas, característica que les confiere una gran superficie interna favoreciendo su reactividad, entonces, como puzolana sirve tanto el sedimento como la roca. En rocas y materiales volcánicos hay que considerar dos factores diferentes controladores de la actividad puzolánica; por una parte, la composición química del magma originario que determina la de los productos, y por otra, la constitución y textura de los minerales de dichas rocas, las cuales dependen de la velocidad de enfriamiento y de los procesos de meteorización que los hallan afectado (4, 9, 12).

En las rocas volcánicas son especialmente interesantes las rocas ácidas (ricas en cuarzo y feldespato). Químicamente tienen la composición que se muestra en la tabla 2.

- Rocas o minerales sedimentarios ricos en sílice hidratada y formadas en yacimientos submarinos, por acumulación de esqueletos y caparzones de radiolarios y diatomeas. Dentro de éstos están el ópalo, el trípoli y las diatomitas. Químicamente tienen la composición que se muestra en la tabla 2:

Tabla 2. Composición química típica de las puzolanas volcánicas y puzolanas sedimentarias orgánicas.

<i>Puzolanas Volcánicas</i>								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Variación	42-73	10-20	1-14	0-12	1-11	1-5	1-5	0-0.5
Promedio	57.4	15.8	5.5	4.7	2.1	3.2	3.1	-
<i>Puzolanas Sedimentarias Orgánicas</i>								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Variación	42-58	13-19	4-14	1-12	1-11	1-7	1-7	-
Promedio	57.4	15.8	5.5	4.7	2.1	3.2	3.1	-

- Existen algunas rocas y minerales que no son puzolánicos pero que al descomponerse generan productos de naturaleza puzolánica, los cuales son muy escasos en el mundo.

3.3.3.2 Puzolanas Artificiales: Son materiales que deben su condición puzolánica a un tratamiento térmico adecuado. Dentro de esta denominación se incluyen los subproductos de determinadas operaciones industriales; tales como, residuos de bauxita, polvos de chimeneas de altos hornos, cenizas volantes, etc. Las de mayor peso en la actualidad, en el mundo, son las cenizas volantes en función de las ventajas económicas y técnicas que ofrecen ya que es un material de desecho y en los cementos facilitan su manejo y disminuyen el calor de hidratación porque son muy buenas puzolanas.

Mineralógicamente las cenizas volantes se componen de:

- Sílico-aluminatos vítreos
- Compuestos cristalinos de Fe, Na, K y Mg entre otros
- Carbón no quemado

La reactividad de las cenizas volantes como puzolanas depende del tipo y origen del carbón, composición química y mineralógica de éste, del contenido de fase vítrea después de quemado y de la granulometría principalmente (4, 5, 10, 11).

3.3.3.3 Puzolanas mixtas o intermedias: Son aquellas puzolanas que, naturales por su origen, se someten a un tratamiento térmico con el objeto de cambiar sus propiedades para aumentar su reactividad química. Dentro de éstos se incluyen las zeolitas, suelos, rocas, cascarilla de arroz y las arcillas, un representante típico de éstas últimas es el polvo de ladrillo, obtenido como producto de desecho de la industria de la cerámica roja. La factibilidad de que un material arcilloso sometido a un tratamiento térmico permita la formación de compuestos puzolanicamente activos depende principalmente de:

- Estructura y constitución mineralógica
- composición química
- Temperatura
- Tiempo de cocción y de enfriado

3.3.4 VALORACIÓN DE LA PUZOLANICIDAD

El hecho de que la puzolanidad pueda deberse a diferentes causas, además de que esta propiedad se manifiesta de diferentes maneras, hace verdaderamente difícil imaginar un único método que con carácter general permita llevar a cabo una estimación del valor puzolánico en condiciones equiparables en materiales distintos. Además, es importante resaltar que los ensayos que se practiquen en la determinación de la actividad puzolánica solo serán válidos en la medida que reflejen las condiciones reales de su posible uso (4, 9, 10, 13).

3.3.4.1 Criterios Cualitativos: Son bastante empíricos, dudosos y poco precisos.

3.3.4.1.1 Químicos: Detecta la capacidad de reacción de los materiales puzolánicos en una disolución de hidróxido de calcio. El método consiste en observar la formación de flóculos, su cantidad y velocidad de sedimentación (13).

3.3.4.1.2 Físicos y tecnológicos: Uno es la observación al microscopio del material para definir la perfección de su estructura cristalina, además, se determina la capacidad de absorción de agua cuando está finamente molido. Otro ensayo consiste en la elaboración de pequeñas probetas de mezcla del material con cal hidratada, éstas se conservan durante tres días en ambiente húmedo y sin dióxido de carbono, al cabo de los cuales se comprueba si se ha producido algún endurecimiento de la masa. Se considera que el material ensayado es puzolánico cuando las probetas así conservadas resisten, sin deshacerse, dos horas en agua hirviendo (14).

3.3.4.2 Criterios Cuantitativos: Son más elaborados y precisos, permiten realizar comparaciones entre resultados de un mismo ensayo.

3.3.4.2.1 Químicos: También se basan en la reacción de la muestra puzolánica con agua de cal pero se usa la química determinativa y los análisis complejo métricos. La principal carencia de éstos es que *no reproducen las condiciones reales* en las que trabajará el material puzolánico (4, 14).

3.3.4.2.2 Físicos y Tecnológicos: Se elaboran probetas y se les hacen ensayos de resistencia a la tracción y a la compresión. En este estudio solo se determinará la resistencia a compresión.

3.3.4.2.2.1 Método para determinar porcentaje de Actividad Hidráulica (ASTM C-595 Anexo 1): Es el método más difundido para ensayar cementos puzolánicos(Ver Sección 6.5.6). Este método consiste en la medición de la resistencia a compresión de muestras de morteros endurecidos en forma de cubos de 2*2*2 pulgadas, utilizando moldes que cumplen con la especificación de la norma ASTM C-109 (15)(Ver Sección 4.5). En este método se establece una comparación entre un mortero control (con cemento y árido estándar) y un mortero con el 35% en volumen de puzolana que sustituye al cemento. La cantidad de agua se establece para una consistencia dada (Flow, Ver siguiente sección). De este modo, se establece el porcentaje de Actividad Hidráulica (%AH), como cociente entre las resistencias mecánicas a compresión (15) del mortero test con puzolana (R_t) y del mortero control (R_o):

$$\%Actividad\ hidráulica = \frac{R_t}{R_o} \times 100$$

3.3.4.2.2.1.1 Método para determinar Flow (Consistencia), (ASTM C – 1437): El presente método (17) se aplica en el análisis de flow en mortero de cemento. El flow es una medición física reportada en porcentaje que indica el flujo del cemento (Ver Sección 6.5.4).

3.3.4.2.2.2 Técnica de Fluorescencia de Rayos X (XRF) para la determinación de óxidos y módulos de cemento, puzolana y aditivo, vía pastilla fundida: Este método se basa en la facilidad de excitar una muestra mediante la irradiación con un haz de rayos X procedente de un tubo de rayos X o de una fuente radiactiva. Ya estando la muestra bajo estas

condiciones, sus elementos se excitan a raíz de la absorción del haz primario y emiten sus propios rayos X fluorescentes característicos, por lo tanto es un método basado en la fluorescencia de rayos X (XRF). Lo particular de este método es que no es destructivo, rápido y su precisión es comparable a otros métodos instrumentales y complejométricos (18). Este método consta en la dispersión de la muestra (cemento, puzolana y aditivo) en medio vítreo, en otras palabras se prepara un solución sólida. Esto se alcanza al tratar la muestra con un fundente el cual baja el punto de fusión de los componentes de la muestra y a su vez provee un medio de dispersión, al estar la muestra en esta forma se le denomina pastilla fundida. A esta pastilla fundida se le determina sus elementos, óxidos y módulos útiles en la industria cementera con curvas de calibración respectivas para cada analito, por medio de XRF. Este método cumple con las designaciones hechas por la norma ASTM C 114 – 05 (19).

3.3.5 UTILIZACIÓN DE LAS PUZOLANAS

El primer criterio que apoyó la producción de cementos puzolánicos fue el corregir el cemento Pórtland tipos I y II fijando la cal libre, generada durante la formación de los silicatos bi y tricálcicos, la cual es inestable a pH menores de 12, para formar compuestos estables que no son vulnerables a la acción lixivante de las aguas ácidas. Pero adicionalmente estos materiales tienen otros efectos sobre el cemento y el concreto:

- a) Reemplazan una buena porción del cemento Pórtland del 20 al 40%, disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más barata que el clinker y más económica de moler.
- b) Reduce el calor generado durante la hidratación, la cual es una reacción bastante exotérmica.
- c) Evita el agrietamiento del concreto por la acción expansiva de la cal al hidratarse y compresiva al secarse.

d) Rebajan en cierto porcentaje los aluminatos que son inestables en medios sulfatados y absorben álcalis, los cuales normalmente entran a reaccionar de manera perjudicial con los agregados del concreto (2, 4, 6).

Dependiendo de las propiedades del cemento se define el porcentaje que se puede adicionar para que las resistencias a la compresión no caigan por debajo de los valores mínimos permitidos en las normas del ASTM. Porque las puzolanas al ser materiales muy finos, normalmente, recubren los áridos en el concreto impidiendo su contacto con el cemento creando zonas de debilidad (14).

3.4. ESTUDIOS RELACIONADOS

Técnicas conductimétricas han sido aplicadas con diferentes propósitos en el campo de los cementos. El desarrollo de la reacción CH-puzolana provoca la formación de productos insolubles, por lo que disminuye la concentración de CH. Esto trae como consecuencia una variación de la conductividad, cuya rapidez de cambio depende de la mayor o menor reactividad de la puzolana (20).

Raask and Bhaskar (20) fueron los primeros en diseñar un método para evaluar la actividad puzolánica midiendo la conductividad eléctrica. Este método permite medir la cantidad de sílice disuelta en una disolución de ácido fluorhídrico en el cual el material activo es dispersado y a partir de aquí se calcula un índice de puzolanicidad. Luxán y col. (21) desarrollaron un método muy rápido y simple para la evaluación indirecta de la actividad puzolánica de puzolanas naturales. En este método se mide la conductividad de una suspensión de OH⁻-puzolana.

Posteriormente, Sugita y col. (22, 23) evaluaron la actividad puzolánica de la ceniza de cascarilla de arroz (RHA) aplicando el método de Luxán, encontrando una buena correlación entre el contenido de sílice no cristalina en muestras de RHA y la variación en la conductividad eléctrica en suspensiones de RHA-disolución saturada de cal. En pastas de cemento conteniendo puzolanas. Thashiro y col. (24) propusieron un método rápido para

evaluar la actividad puzolánica midiendo la resistencia eléctrica, donde solo 72 h fueron requeridas para la prueba.

Los métodos anteriores para evaluar la actividad puzolánica están dirigidos más bien al aspecto cualitativo del comportamiento de estos materiales puzolánicos y no al aspecto cuantitativo de la reacción OH^- -puzolana como lo es el cálculo de los coeficientes cinéticos del proceso. Es conocido que la reacción álcali (o cemento)-puzolana no es aún bien comprendida y es objeto de estudio por muchos investigadores (3, 24). El estudio de la cinética de reacción puzolánica tiene un gran interés científico e importancia tecnológica. Desde el punto de vista científico y para numerosas aplicaciones industriales, modelos simples pero precisos que describan estos fenómenos son de suma importancia, constituyendo el desarrollo de tales modelos un tópico de gran interés científico con gran aplicación práctica y económica (4, 21-30).

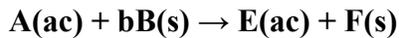
Los modelos más populares son el de Jander y Zhuralev (26). Otros autores (27-31) han desarrollado modelos matemáticos para describir la cinética de reacción puzolánica, pero ellos no siempre concuerdan con los resultados experimentales.

En otro estudio Villar, González y Hernández (32) elaboraron un modelo matemático que permite describir la cinética de reacción tanto bajo régimen cinético como cinético-difusivo. La magnitud tomada del experimento es la conductividad eléctrica, la cual se mide fácilmente y es correlacionada con la concentración de CH. Esto permitió seguir la cinética de reacción de las puzolanas artificiales SCSA, SCBA y RHA con el empleo de un sencillo equipamiento experimental. El ajuste del modelo por métodos computarizados permitió determinar los parámetros del proceso tales como el coeficiente de difusión y la constante de velocidad de reacción, lo cual posibilitó evaluar de una manera rápida y efectiva, la actividad puzolánica de estos materiales. (32)

Varios métodos han sido aplicados para evaluar las puzolanas (12, 15, 20, 24, 32). Estos contemplan puntos de vista químicos, físicos y mecánicos, y establecen evaluaciones cualitativas y cuantitativas acerca de la actividad puzolánica. Estos métodos se basan, en la

mayoría de los casos, en la reacción del material puzolánico en sistemas OH^- – puzolana o cemento – puzolana. Como ni el mecanismo, ni la cinética de las reacciones puzolánicas son bien entendidas en el presente, existe disparidad de criterios acerca de como evaluar las propiedades de una puzolana.

La reacción puzolánica es una reacción heterogénea. Esta puede considerarse dentro del tipo sólido-disolución:



Para describir esta ecuación, se han propuesto algunos modelos. Villar, González y Hernández (32) usaron el Modelo del núcleo menguante (MNM) o Modelo de núcleo sin reaccionar (33).

De acuerdo con este modelo, cuando la disolución A (con concentración C_b) reacciona sobre la superficie del reactante sólido B (de radio r_s) se va formando una capa de productos de reacción F y el núcleo sin reaccionar (con radio r_c) disminuye gradualmente. Si esta capa se supone porosa la reacción tiene lugar por difusión de A a través de la capa F hasta efectuarse la misma en la interfase entre F y el núcleo sin reaccionar. La temperatura a través de toda la región heterogénea es considerada uniforme.

Se hacen dos suposiciones

- Se conserva la forma esférica del gránulo y las densidades de F y B son iguales. En consecuencia el radio total del gránulo r_s no cambia con el tiempo y no existe una región intermedia entre el gránulo y la capa de productos F.
- La velocidad de movimiento de la interfase de reacción dr_c/dt es pequeña con respecto a la velocidad de difusión de A a través de F (estado semi-estable). Esto es válido cuando la densidad del fluido en los poros de F es pequeña comparada con la densidad de B, lo cual en general es cierto.

En la Figura No. 6 (Ver Anexos) se muestra un esquema de los perfiles de concentraciones acorde con el MNM. Para el caso del sistema cal/puzolana, la reacción puzolánica ocurre a través de las siguientes etapas (28):

- Difusión de los iones Ca^{2+} de la disolución hasta la superficie de las partículas de puzolana.
- Adsorción de los iones Ca^{2+} en la superficie de la partícula de puzolana.
- Difusión de los iones Ca^{2+} a través de la capa de los productos de reacción formada alrededor del núcleo de reactante que aún no ha reaccionado.
- Interacción química entre los iones Ca^{2+} y la partícula de puzolana.

En otra investigación (12) se caracterizaron cuatro diferentes materiales naturales de origen ígneo. Se determinó el índice de actividad puzolánica en sistemas puzolanas naturales-portlandita, utilizando para esto la resistencia mecánica a la compresión en cubos de morteros. Además, se evaluó la velocidad de reacción puzolánica, utilizando pastas hechas con las mismas proporciones que los morteros excepto la arena estándar, midiendo los cambios de concentración de la portlandita con respecto al tiempo.

Suesta, Tendero y Beleña (25) realizaron un estudio para determinar el efecto de la activación del humo de sílice (una puzolana artificial) con varias adiciones alcalinas, donde la activación la determinaron a través de resistencias mecánicas. En este estudio los autores fracasaron en establecer una correlación entre las resistencias con el contenido en agua combinada como CSH, sin embargo lograron a través de espectros de NMR de Si^{29} atribuir el aumento de resistencias al entrecruzamiento de las cadenas CSH. Diversos autores han atribuido el aumento de resistencia de los hormigones con adición de humo de sílice a la formación de un gel CSH mas denso y homogéneo en la zona de interfase entre la pasta de cemento y el árido.

Varios estudios (1, 4) se han hecho sobre como diversos factores influyen en la resistencia a compresión de cementos puzolánicos, por ejemplo: el contenido de álcali soluble e insoluble, el SO_3 en clinker y adiciones de yeso, el efecto de componentes menores (MgO), área superficial específica, distribución de tamaño de partícula, efecto de la microestructura de clinker. Entre estos destacan el efecto del área superficial específica o Blaine, la cual al aumentar tiene el mismo efecto en el desarrollo de resistencia mecánica. Se ha deducido el efecto inverso en la resistencia al tener una mayor distribución del tamaño de partícula. Esto conlleva a creer que una microestructura mas uniforme generada de un cemento finamente molido resulta en una resistencia a compresión mayor (4).

4. JUSTIFICACIÓN

La diversidad de aplicaciones que tiene el cemento en la actualidad hace que sea necesario elaborar productos de diferentes características, obedeciendo a las distintas necesidades de resistencia mecánica y química, color, tiempos de fraguado, costos, entre otras. Para lograrlo se requiere utilizar, en su elaboración, sustancias naturales o sintéticas que impriman al cemento las propiedades requeridas. Esta función la cumplen los llamados aditivos. Dentro de los aditivos se encuentran las puzolanas.

La utilización de las puzolanas en el cemento aumenta la durabilidad de este, manifestada en: un aumento en la impermeabilidad; aumenta la resistencia al ataque de sulfatos(1), aumenta la resistencia al fisuramiento térmico(34); aumenta la resistencia mecánica al envejecimiento; reduce la reacción álcali-agregado; aumenta la capacidad cementante(15), por lo tanto, conlleva a un beneficio económico al disminuir el consumo de cemento Pórtland para obtener la misma(o mayor) resistencia mecánica, ahorrando energía y produciendo menores emisiones de CO₂ a la atmósfera.

La activación de las puzolanas es un fenómeno químico inorgánico, ligado al CaO libre y asociado al contenido de álcalis y SO₃ en disolución (los cuales pueden interactuar para activar la “puzolanidad” de los materiales). La evaluación de la actividad puzolánica de un material ha motivado el desarrollo de numerosos métodos, esta diversidad se debe a que la reacción puzolana-álcali (o cemento) no es del todo bien comprendida aún. La “puzolanidad” es un término muy complejo debido a la existencia de diferentes mecanismos de la interacción puzolana- OH⁻ y a una variación considerable en la naturaleza de los materiales que muestran esta propiedad. Las implicaciones económicas que se pueden generar del estudio de este fenómeno son enormes, dada la necesidad de tener materiales adecuados para su uso en construcción para todo tipo de infraestructura, además es de suma importancia ya que se puede contribuir a disminuir los consumos de energía de la industria cementera y producir materiales sustentables.

La crisis energética (35, 36, 37) y los problemas ecológicos (37, 38, 39) han revivido en las últimas décadas el tema de los aglomerantes álcali-puzolana los cuales se han convertido en una interesante alternativa para construcciones sociales en países en desarrollo.

La posibilidad de que una puzolana reaccione en presencia de un aditivo alcalino hidratado $MO_x(OH)_n$ varía grandemente en dependencia de un gran número de factores. Por lo tanto es muy importante evaluar esta propiedad, ya que permite predecir el efecto de la reacción de hidratación en las propiedades del cemento.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General:

Evaluar el efecto de un aditivo alcalino hidratado ($\text{MO}_x(\text{OH})_n$) sobre la actividad hidráulica de las puzolanas en morteros endurecidos de cemento.

5.2. Objetivos Específicos:

5.2.1 Establecer una relación entre los porcentajes de actividad hidráulica manifestados con la cantidad (porcentaje con respecto a material puzolánico utilizado) de aditivo agregado

5.2.2. Caracterizar el material puzolánico determinando su composición química a través de fluorescencia de rayos X y utilizar esta información para inferir sobre la activación de las puzolanas.

6. HIPÓTESIS

Existe una relación directa entre el Porcentaje de Actividad Hidráulica y el porcentaje de aditivo agregado como activante en los morteros endurecidos de cemento Pórtland a los 28 días de curado.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Universo y muestra.

7.1.1 Universo de trabajo:

Morteros endurecidos de cemento Pórtland.

7.1.2 Muestra:

Se utilizaron morteros endurecidos de cemento Pórtland, los cuales tendrán diferentes porcentajes de aditivo (0, 0.5, 1.0 y 1.5%) con respecto de la masa de material puzolánico natural utilizado. Esos morteros a su vez tendrán un 35% de sustitución, en volumen, de cemento por material puzolánico.

7.2. Recursos Humanos:

Br. Jason Brian Marroquin, estudiante de la carrera de Química.

Asesores: Licda. Diana Pinagel; Lic. Luís Velásquez.

7.3. Recursos Materiales.

7.3.1 Equipo:

- Balanza con las siguientes especificaciones: capacidad mínima de 3,000 g y tolerancia de aceptación de ± 0.3 g.
- Recipiente graduado para medir volumen de líquidos de 200 a 300 ml ± 2.0 ml.
- Espectrómetro de Rayos X, marca ARL
- Analizador granulométrico láser (CILAS)
- Computadora con Software WIN-XRF y Particle Expert®.
- Mufla que opera a $1,100 \pm 50^\circ\text{C}$
- Molino de disco Herzog.
- Mezcladora Mecánica: que cumpla con las especificaciones de la norma ASTM respectiva.

- Gabinete húmedo: que cumpla con las especificaciones de la norma ASTM respectiva.
- Maquina Rompe-cubos,
- Medidor de longitud en la mesa de Flow.
- Cuchara de Albañil con ½ libra de capacidad.

7.3.2 Cristalería:

- Balón aforado de Le Chatelier
- Vasos de precipitados de 500 ml.
- Matraz Erlenmeyer de 250 ml.
- Vasos de precipitados de 250 ml.
- Vidrios de reloj.
- Agitadores de vidrio.

7.3.3 Materiales:

- Moldes para cubos de 2 pulgadas³
- Crisol de Platino / oro con capacidad de 25ml
- Molde de Platino / oro con diámetro de 40mm
- Tamper
- Moldes para flow
- Mesa para medir flow: que cumpla con las especificaciones de la norma ASTM respectiva.

7.3.4 Reactivos:

- Spectromelt A-10 (reactivo para preparación de pastilla fundida).
- Bromuro de Litio.
- Aditivo alcalino hidratado.
- Cemento Control conforme a los requerimientos de la norma ASTM C 150
- Queroseno libre de agua
- Puzolana natural presente en la cantera de Cementos Progreso.

- Arena silica estándar conforme a los requerimientos de la norma ASTM C 778.

7.4 Recursos económicos e institucionales.

7.4.1. Institucionales:

Laboratorio Químico y Físico Cementos Progreso, S. A. Planta San Miguel, Sanarate, El Progreso

7.4.2. Económicos:

<i>Equipo, material o Cristalería</i>	<i>Precio Estimado.</i>
<i>Balanza</i>	<i>3,500Q.</i>
<i>Mezcladora mecánica</i>	<i>8,000 Q.</i>
<i>Tamper</i>	<i>75 Q.</i>
<i>Maquina Rompecubos</i>	<i>16,000 Q.</i>
<i>Arena Silica Estándar</i>	<i>400 Q.</i>
<i>Aditivo</i>	<i>1500 Q.</i>
<i>Puzolana Natural</i>	<i>90 Q.</i>
<i>2 Vasos de precipitados de 500ml</i>	<i>80 Q.</i>
<i>2 Vasos de precipitados de 250ml</i>	<i>40 Q.</i>
<i>Erlenmeyer de 250ml</i>	<i>23 Q.</i>
<i>Agitador de Vidrio</i>	<i>5 Q.</i>
<i>Vidrio de reloj</i>	<i>10 Q.</i>
<i>TOTAL</i>	<i>29, 723 Q.</i>

7.5. Metodología.

7.5.1 Diseño Experimental y Diseño Estadístico.

- a) Caracterización fisicoquímica de las muestras a utilizar:
 - Determinación de la proporción de óxidos y módulos en cemento, aditivo y puzolana a utilizar con espectrómetro de fluorescencia/difracción de rayos X.
 - Análisis granulométrico de las puzolanas con diferentes porcentajes de aditivo, en un granulómetro láser (aparato CILAS).
- b) Determinación de los porcentajes de actividad hidráulica (%AH).
- c) Variables independientes:
 - Porcentajes de aditivo: 0, 0.5, 1.0, y 1.5%
 - Días de Curado: 3, 7 y 28.
- d) Variables dependientes:
 - Porcentaje de Actividad Hidráulica (%AH)
- e) Se realizaron 4 replicas de muestreo para obtener un nivel de confianza de 95%.
- f) Análisis de regresión, entre las variables, evaluándose estadísticamente por medio del coeficiente de determinación (r^2) y análisis de varianza para la regresión, donde este análisis proporcionara un valor P el cual indica la significancia estadística.
- g) Se harán inferencias, sobre el efecto que ejerció las características (composición química y granulométrica) de las puzolanas sobre la activación química y por consiguiente sobre la actividad hidráulica manifestada para cada muestra.

7.5.2 Método de Fluorescencia de rayos X (XRF) para determinar óxidos y módulos de cemento, puzolana y aditivo, vía pastilla fundida.

7.5.2.1 Preparación de la pastilla.

En muestras como puzolana, cemento y aditivo, se debe conocer su pérdida al fuego (PF) esto es su pérdida en peso luego de someterse a 950°C, ya que son materiales que contienen componentes que se volatilizan a temperaturas mayores. Se calcula la cantidad de material y fundente (Spectromelt A-10) de acuerdo a que la relación de fundente-muestra, sea 7:1. Se utiliza la siguiente fórmula para calcular cantidad de muestra y fundente a utilizar:

$$\text{gramos muestra} = \frac{1}{(100 - \text{PF})} \times 100$$

a) Mezclar y homogeneizar el fundente con la muestra, dentro de un frasco de vidrio. Agregar 0.020g de LiBr y agregar el material a fundir.

b) Introducir el crisol (con la muestra) y el molde Pt/Au, dentro de la mufla a una temperatura de $1100 \pm 50^\circ\text{C}$ durante 7 ± 1 minutos.

c) Transcurrido el tiempo indicado y utilizando una pinza para crisol, se homogeneiza con movimientos circulares el material fundido y luego se agrega dentro del molde Pt/Au.

d) Tomar el molde por una esquina con una pinza para crisol y moverlo en forma circular, tratando de desplazar todo el material en la superficie del molde.

e) Dejar enfriar la pastilla preparada en la superficie del molde (unos 4 a 8 minutos), colocando el molde en una superficie plana.

f) Sacar la pastilla del molde, dando vuelta al molde y teniendo cuidado que la pastilla no se quiebre.

g) La pastilla queda lista para el análisis por Rayos X, por lo tanto se corre en el analizador (Equipo ARL) con la curva de calibración correspondiente.

7.5.3 Método para la determinación de peso específico para cemento y arena volcánica. (ASTM C – 188)

7.5.3.1 Descripción.

a) Llenar el balón de Le Chatelier (balón graduado especial para determinar densidades) con la queroseno, hasta la medida entre 0 y 1 ml. Para ello se utiliza un embudo de vidrio, se agrega el queroseno dentro del embudo con un Vaso de precipitados.

b) Secar el interior del balón, ya sea al aire o utilizando etanol u otro solvente volátil para desplazar el agua.

c) Pesar la muestra (cemento o arena) en una balanza analítica. Se necesitan 64g para cemento o 50g para arena volcánica, con exactitud de $\pm 0.05g$.

d) Agregar una cantidad de muestra dentro del balón. Agregarlo poco a poco manteniendo la temperatura para evitar variaciones de temperatura mayor de $0.2^{\circ} C$. Evitar que el material salpique o que se pegue en las paredes del balón.

e) Después de introducir todo el material en el balón, colocar el tapón y girar el balón en posición inclinada sobre una plancha de hule.

f) Introducir el frasco dentro del baño de agua y tomar la lectura final en la escala numerada.

g) La diferencia entre la lectura inicial y final, corresponde al volumen de líquido desplazado.

h) Calcular el resultado final con la siguiente fórmula:

$$Densidad (\rho) \text{ en g/cm}^3 = \frac{\text{masa de material (g)}}{\text{volumen desplazado (cm}^3\text{)}}$$

i) Anotar el resultado.

7.5.4 Método para determinar Flow (ASTM C - 1437).

7.5.4.1 Descripción:

- a) Colocar el molde en el centro de la mesa de flow.
- b) Agregar mortero aproximadamente 1 pulgada de espesor (preparado según el Método para la determinación de resistencias a la compresión) en el molde hasta la mitad del mismo. Anotar el tiempo inicial en la prueba.
- c) Golpear con el tamper 20 veces en toda la superficie del mortero.
- d) Llenar el molde hasta que sobresalga una pequeña cantidad de mortero, y luego golpear 20 veces con el tamper.
- e) Nivelar el mortero con una cuchara de albañil, mediante un movimiento suave sobre la orilla del molde.
- f) Limpiar la mesa de flow de cualquier exceso de mortero o agua que pueda tener en la superficie.
- g) Retirar el molde del mortero 1 minuto después de completar la operación de mezclado. Inmediatamente activar el mecanismo de la mesa de flow para dar 25 golpes en 15 s.
- h) Utilizando el medidor de longitud, determinar el flow midiendo 4 veces el diámetro del mortero a lo largo de las líneas marcadas sobre la mesa en 4 diferentes posiciones de la mesa sucesivamente. (L1, L2, L3 y L4).
- i) Regresar el mortero al recipiente, para continuar con el Método para la determinación de resistencia a la compresión SAC-SM-CC-ME-13.
- j) Calcular resultados y anotarlos.

$$Flow = L1 + L2 + L3 + L4$$

7.5.5 Método para determinar resistencia a compresión de morteros endurecidos de cemento, (ASTM C-109).

7.5.5.1 Descripción:

a) Se inicia con la preparación de la muestra a analizar (ver Procedimiento de Método para determinar Porcentaje de Actividad Hidráulica), el agua y la arena estándar a utilizar. Todos los materiales preparados, son para obtener 6 cubos.

b) Homogenizar la muestra tomada, dentro de una bolsa de nylon con una capacidad de 25 lb, durante 1 minuto. Luego se deja reposar la muestra, con la bolsa cerrada, durante 1 minuto. La cantidad de materiales que deben de mezclarse a la vez en un lote de mortero para seis muestras de prueba es en base a la siguiente tabla:

Material	6 cubos
Cemento (g)	500
Arena (g)	1375
Agua (mL)	Necesaria para flow 110±5
Cemento Pórtland	242
(0.485)	230
Pórtland con aire retenido	-----
Otros (flow de 110±5)	

c) Pesar en la balanza el cemento, utilizando un recipiente plástico. En otro recipiente, pesar la arena estándar.

d) Medir la cantidad de agua desmineralizada requerida, utilizando una bureta de vidrio, con capacidad máxima de 250 mL. La cantidad de agua utilizada en el cemento debe ser la necesaria para obtener un flow de 110 ± 5 (ver Método para la determinación de flow).

e) Armar la mezcladora, colocando el tazón y espátula en el soporte de la misma. El tazón y espátula deben estar secos y limpios.

7.5.5.2 Preparación del Mortero:

a) Colocar la paleta y la olla en la posición de la mezcladora. También introducir los materiales para un lote dentro de la olla y mezclar en la siguiente forma:

-Colocar toda el agua que fue medida para la prueba, en la olla.

-Adicionar el cemento al agua. Iniciar el proceso de mezclado y mezclar a velocidad lenta (140 ± 5 revoluciones/minuto) durante 30 segundos. El tiempo se mide con un reloj de pared.

-Agregar toda la cantidad de arena lentamente en un periodo de 30 segundos, mezclando a la vez a velocidad lenta.

-Detener la mezcladora, cambiar a velocidad media (285 ± 10 rev./minuto) y mezclar durante 30 segundos.

-Detener la mezcladora y dejar reposar el mortero durante $1 \frac{1}{2}$ minutos. Durante los primeros 15 segundos del intervalo, rápidamente bajar el mortero que pueda estar en los lados de la olla. El resto del tiempo, cubrir la olla con el cobertor de madera.

-Mezclar durante 1 minuto a velocidad media (285 ± 10 revoluciones/minuto).

b) Hacer la medición de flow del mortero (Método para la determinación de flow).

c) Se regresa al tazón, todo el mortero utilizado en la medición de flow y mezcla a velocidad 2, durante 15 segundos. Cuando se hace un lote por duplicado, la prueba de flow es omitida y el mortero se deja reposar durante 90 segundos sin colocarle cobertor.

7.5.5.3 Llenado de moldes y curado del mortero:

a) Iniciar el llenado de los moldes con el mortero, en un tiempo total no mayor de 2 minutos y 30 segundos de haber finalizado la mezcla del mortero. El llenado se hace en 2 etapas, colocando una primera capa de mortero de aprox. 1 pulgada de espesor (la mitad de la profundidad del molde). Se golpea con el tamper el mortero en cada compartimiento de los cubos, 32 veces en aproximadamente 10 segundos en cuatro rondas. La presión aplicada deberá ser la necesaria para asegurar el llenado uniforme de los moldes.

b) Con el mortero que sobra en el tazón, llena cada uno de los cubos hasta completar el volumen, siguiendo los pasos de llenado en la primera capa y llevando el mortero hasta los extremos del molde.

c) Se debe cortar el exceso de mortero sobre la superficie del molde, con una espátula de metal. Limpiar los excesos de mortero, que han quedado sobre el molde, utilizando un trapo húmedo.

d) Identificar los moldes colocarlos en el gabinete húmedo. Los moldes se dejan en el gabinete durante 24 horas. La temperatura interna del gabinete debe ser de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

e) Sacar los cubos de los moldes en un tiempo de 24 ± 0.5 horas después de haber finalizado su preparación y los coloca en agua saturada con cal, dentro del gabinete húmedo. Las muestras a ensayar a 24h, no se colocan dentro del agua con cal.

7.5.5.4 Ensayo de la resistencia a compresión:

a) Determinar la resistencia a compresión, colocando las muestras dentro de la máquina rompe cubos, al cumplirse cada una de las edades en el ensayo con su respectiva tolerancia en horas:

Edad de la Prueba	Tolerancia
3 días	± 1 h
7 días	± 3 h
28 días	± 12 h

b) Si más de una muestra es removida del gabinete para la prueba, mantener las muestras cubiertas con limpiado seco hasta que se cumpla el tiempo de prueba. Es preferible mantener las muestras en agua dentro del gabinete húmedo, hasta el tiempo de prueba.

c) Secar las muestras con un paño y remover alguna partícula de arena o incrustaciones que pueda tener el cubo en la superficie. Revisar que las caras en donde se aplicará la fuerza, se encuentren planas. Si existe curvatura apreciable, se debe lijar la cara del cubo o descartar la muestra. Se pueden obtener resultados bajos en resistencias por la lectura de cubos con irregularidad en las caras.

d) Ensayar los cubos en las siguientes edades:

Edad de la Prueba	# cubos a ensayar
3 días	2
7 días	2
28 días	2

e) Anotar los resultados de cada cubo. Los resultados de compresión de los cubos se proporcionan en dimensionales de presión, para este caso en libras por pulgada cuadrada o sea PSI (Pounds per Square Inch). También calcular el promedio de los tres datos y expresa el resultado final en PSI y anotarlo en el mismo formato.

7.5.5.5 Calculo de Resultados:

$$\text{RESISTENCIA A COMPRESION} = \frac{(L1 + L2.. + Ln)}{n}$$

L1 Y L2 = Lecturas 1 y 2 obtenidas en la maquina.

Ln = Lectura n obtenida, después de 2 muestras.

n = Número de cubos ensayados en la muestra

$$\text{RESISTENCIA A COMPRESION EN PSI} = L * 56.25$$

7.5.6 Método para determinar porcentaje de Actividad Hidráulica en muestras de morteros endurecidos de cemento puzolánico (ASTM C-595 Anexo 1)

7.5.6.1 Preparación de la muestra de cemento puzolánico

a) La muestra de arena volcánica a utilizar debe tener una fineza en malla 325 cercano al cemento control utilizado ($\pm 1\%$ en material no cernido) y preparar aproximadamente 300g.

b) Se debe determinar el peso específico de la muestra de arena volcánica, de acuerdo al Método para la determinación de densidad para cemento y arena volcánica (Ver Sección 6.5.3).

7.5.6.2 Generalidades

a) Se deben preparar cubos de una mezcla control (sin arena volcánica) y de la arena volcánica a evaluar de acuerdo al presente método.

b) El cemento a utilizar debe cumplir con las especificaciones de la norma ASTM C150, para cemento Pórtland.

c) De cada mezcla se prepara 2 moldes de cubos (6 cubos por molde) empleando las cantidades indicadas en la tabla.

d) En la mezcla a evaluar, se reemplaza el 35 % del volumen absoluto de cemento por el volumen absoluto de la muestra de arena volcánica.

Proporciones a emplear para preparar las diferentes mezclas a evaluar (cantidad para 2 moldes).

Mezcla	Cemento Portland (g)	Arena estándar (g)	Agua desmineralizada	Arena volcánica (g)
Control	500	1375	*mL de agua para flow 100 – 115	0
A evaluar	325			$\frac{87.5 \times 2 \times PE_{\text{arena volcánica}}^{**}}{PE_{\text{cemento}}^{**}}$

*mL = Cantidad suficiente para obtener un flow de 100 a 115 (según el Método para la determinación de flow)

** PE = peso específico

7.5.6.3 Medición de Actividad Hidráulica:

a) Colocar los moldes con los cubos en el gabinete húmedo a una temperatura de $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo de 20 a 24 horas.

b) Remover los cubos de los moldes después de cumplirse el tiempo (24 ± 0.5 horas).

c) Para la prueba a 28 días, colocar los cubos en un recipiente contenedor y almacenar a $38 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo de 27 días (± 12 horas)

d) Enfriar las muestras a $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ antes de la prueba.

e) Determinar la resistencia a la compresión en la máquina rompe cubos, de la muestra control y de la muestra de prueba a 3, 7 y 28 días.

f) Calcular el promedio de resistencia de la muestra control y la muestra de prueba (expresado en PSI)

g) Calcular la actividad hidráulica en la arena volcánica con la siguiente fórmula:

En donde:

$$\% \text{Actividad hidráulica} = \frac{\text{promedio}_{\text{muestra arena volcánica}}}{\text{promedio}_{\text{muestra control}}} \times 100$$

A = promedio de resistencias en los tres cubos de la muestra arena volcánica (PSI)

B = promedio de resistencias en los tres cubos de la muestra control (PSI)

h) Anotar el resultado.

8. RESULTADOS

Tabla No. 1

Determinación de óxidos y módulos de cemento control (ARX) según Sección 7.5.2

	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%K ₂ O	%Na ₂ O	%SO ₃	(%PF)	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
	19.09	5.24	2.40	63.58	3.61	0.57	0.67	2.97	4.80	5.12	58.61	9.84	7.30
	±0.08	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.001	±0.001	±0.01	±0.01	±0.01	±0.05	±0.01	±0.01
Dsv.Est.	0.055	0.008	0.005	0.048	0.006	0.0009	0.0007	0.007	0.08				
C.V.*	0.41	0.25	0.32	0.11	0.31	0.17	0.10	0.24	0.23				

(ARX) = *Análisis por Fluorescencia de Rayos X*

(%PF) = porcentaje de pérdida al Fuego, determinada gravimétricamente.

Dsv.Est. = *Desviación Estándar*

C.V.* = Coeficiente de Variación, para n igual a 26.

Tabla No. 2

Determinación de óxidos y módulos de puzolanas (ARX) según Sección 7.5.2

Muestra	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%MgO	%K ₂ O	%Na ₂ O	%SO ₃	%TiO ₂	%MO	(%PF)
PA 0	70.76	14.16	2.47	0.01	3.49	4.85	0.01	0.34	2.25	1.07
	±0.08	±0.01	±0.01	±0.01	±0.001	±0.001	±0.01	±0.01	±0.01	±0.002
PA 0.5	70.03	14.24	2.49	0.01	3.46	4.18	0.01	0.34	2.50	1.14
	±0.08	±0.01	±0.01	±0.01	±0.001	±0.001	±0.01	±0.01	±0.01	±0.002
PA 1.0	70.24	14.11	2.43	0.01	3.39	4.82	0.01	0.34	2.84	1.28
	±0.08	±0.01	±0.01	±0.01	±0.001	±0.001	±0.01	±0.01	±0.01	±0.002
PA 1.5	70.42	14.33	2.45	0.01	3.41	4.01	0.01	0.34	3.13	1.36
	±0.08	±0.01	±0.01	±0.01	±0.001	±0.001	±0.01	±0.01	±0.01	±0.002
Dsv.Est.	0.055	0.008	0.005	0.006	0.0009	0.0007	0.007	0.0009	0.004	0.08
C.V.*	0.41	0.25	0.32	0.31	0.17	0.10	0.24	0.17	0.16	0.23

PA 0 = Puzolana con 0% Aditivo

PA 0.5 = Puzolana con 0.5% Aditivo

PA 1.0 = Puzolana con 1.0% Aditivo

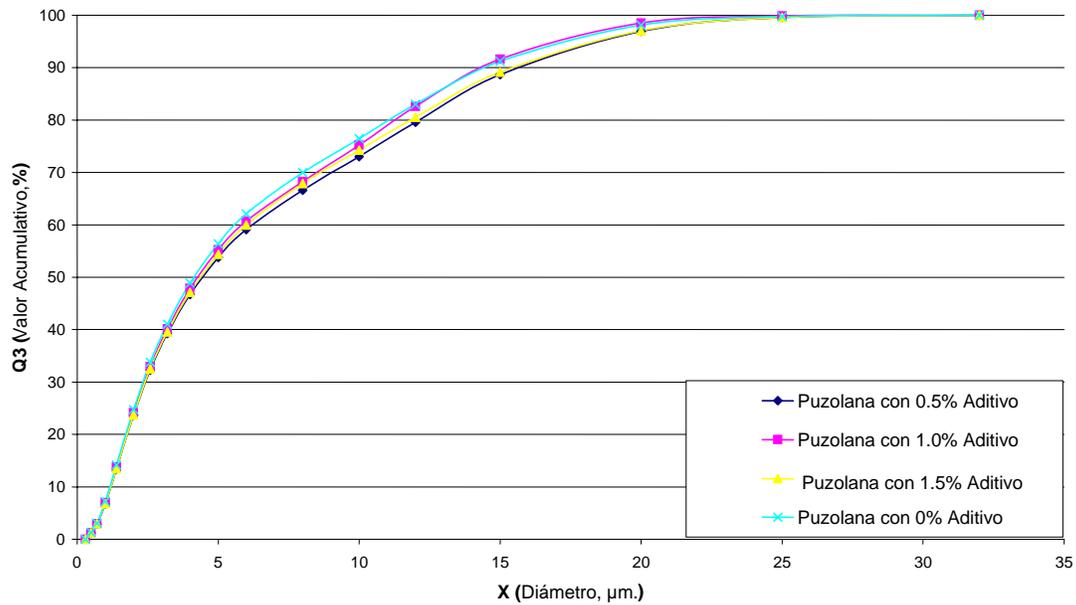
PA 1.5 = Puzolana con 1.5% Aditivo.

(ARX) = *Análisis por Fluorescencia de Rayos X*

(%PF) = porcentaje de pérdida al Fuego, determinada gravimétricamente.

Dsv.Est. = *Desviación Estándar*.

C.V.* = Coeficiente de Variación, para n igual a 26.

Gráfica No.1*Composición Granulométrica de puzolanas***Tabla No. 3***Determinación de Peso Específico y Flow*

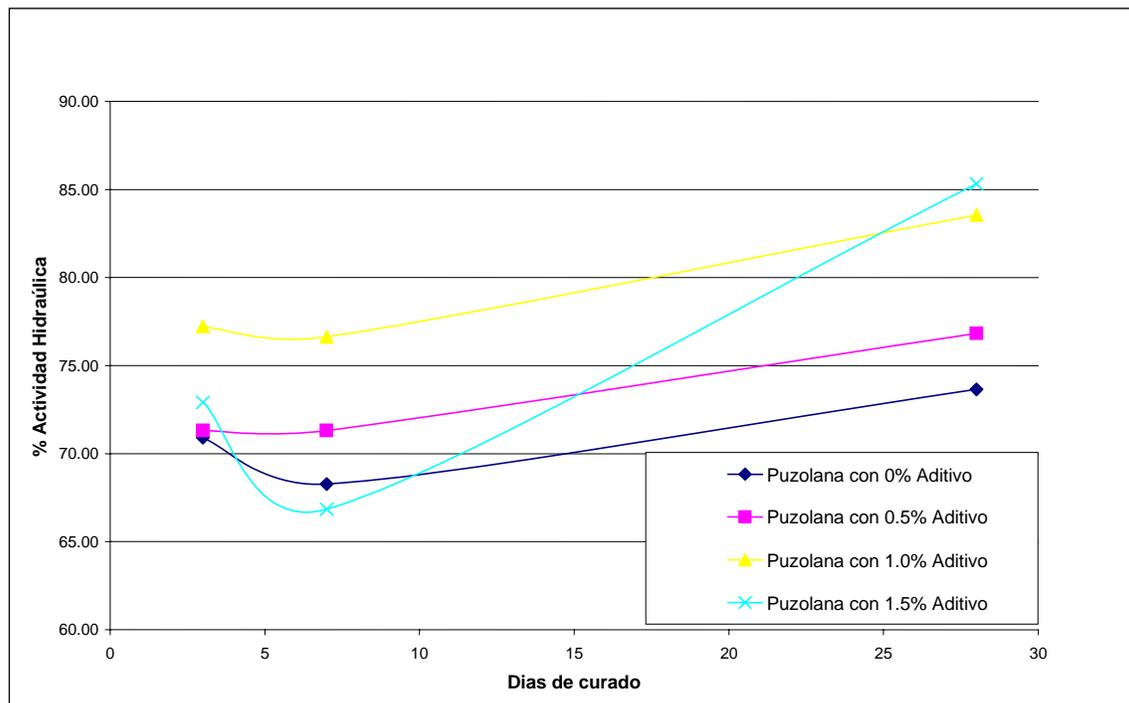
Muestra	Peso Específico (g/cm³)	Flow
Puzolana con 0% Aditivo	$2.52 \pm 7.56 \cdot 10^{-4} (*)$	111
Puzolana con 0.5% Aditivo	$2.52 \pm 7.56 \cdot 10^{-4} (*)$	110
Puzolana con 1.0% Aditivo	$2.52 \pm 7.56 \cdot 10^{-4} (*)$	110
Puzolana con 1.5% Aditivo	$2.52 \pm 7.56 \cdot 10^{-4} (*)$	111
Mortero Control	$3.15 \pm 9.45 \cdot 10^{-4} (*)$	112

(*) = Error máximo para el método ASTM C- 188

Tabla No. 4*Porcentaje de Actividad Hidráulica (%AH) de las puzolanas*

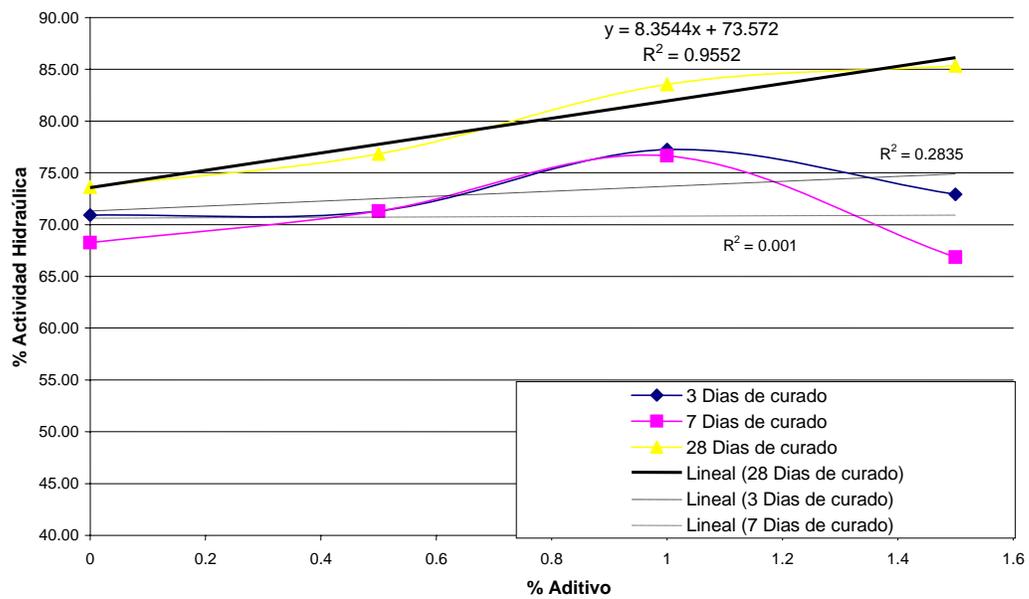
Muestra(*)	Días		
	3	7	28
Puzolana con 0% Aditivo	70.91±2.62	68.27 ±2.52	73.65 ±2.72
Puzolana con 0.5% Aditivo	71.30 ±2.64	71.31 ±2.64	76.83 ±2.85
Puzolana con 1.0% Aditivo	77.23±2.86	76.64 ±2.84	83.55 ±3.09
Puzolana con 1.5% Aditivo	72.92 ±2.70	66.85 ±2.47	85.33 ±3.16
<i>Desviación Estándar(*)</i>	0.3366	0.9815	3.419
<i>Coefficiente de Variación(*)</i>	1.89	1.23	3.57
<i>Coefficiente de determinación, r²</i>	0.001	0.2835	0.9552
<i>Significancia Estadística, Valor P</i>	0.4664	0.9681	0.0226

(*) = Estos valores son determinados para las cuatro réplicas de resistencia a compresión determinadas; para obtener un nivel de confianza del 95%

Gráfica No.2*Porcentaje de Actividad Hidráulica según tiempo de curado*

Gráfica No.3

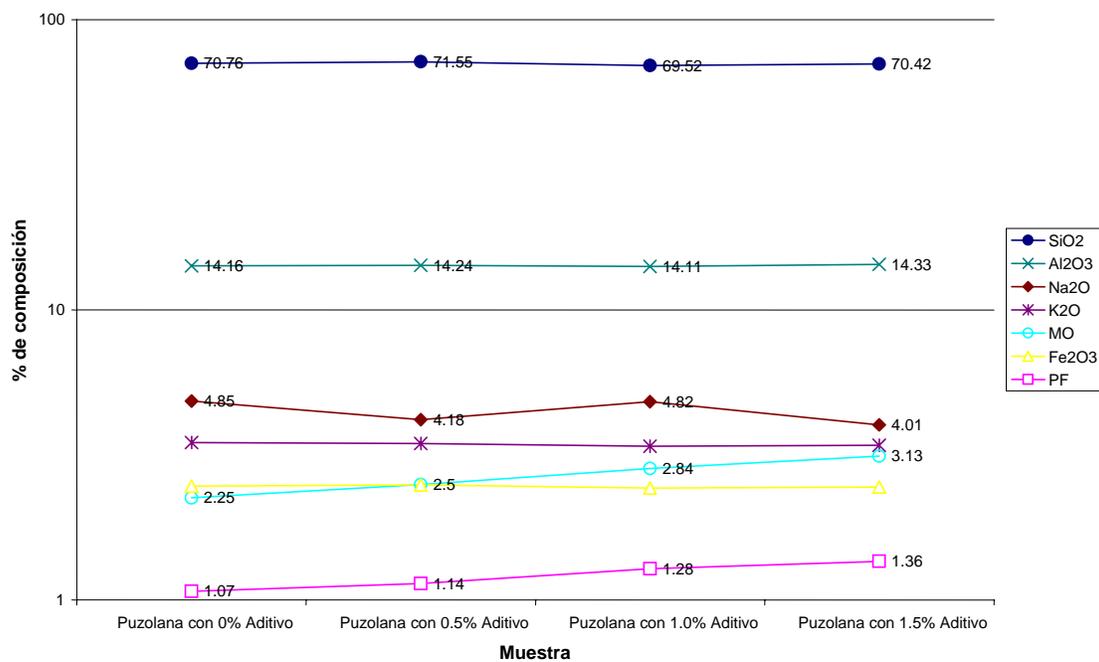
Porcentaje de Actividad Hidráulica según el porcentaje de sustitución con aditivo



En la gráfica No.4 se puede visualizar como los diferentes elementos en la composición química varían según las muestras de puzolana tienen mayor sustitución con aditivo.

Gráfica No.4

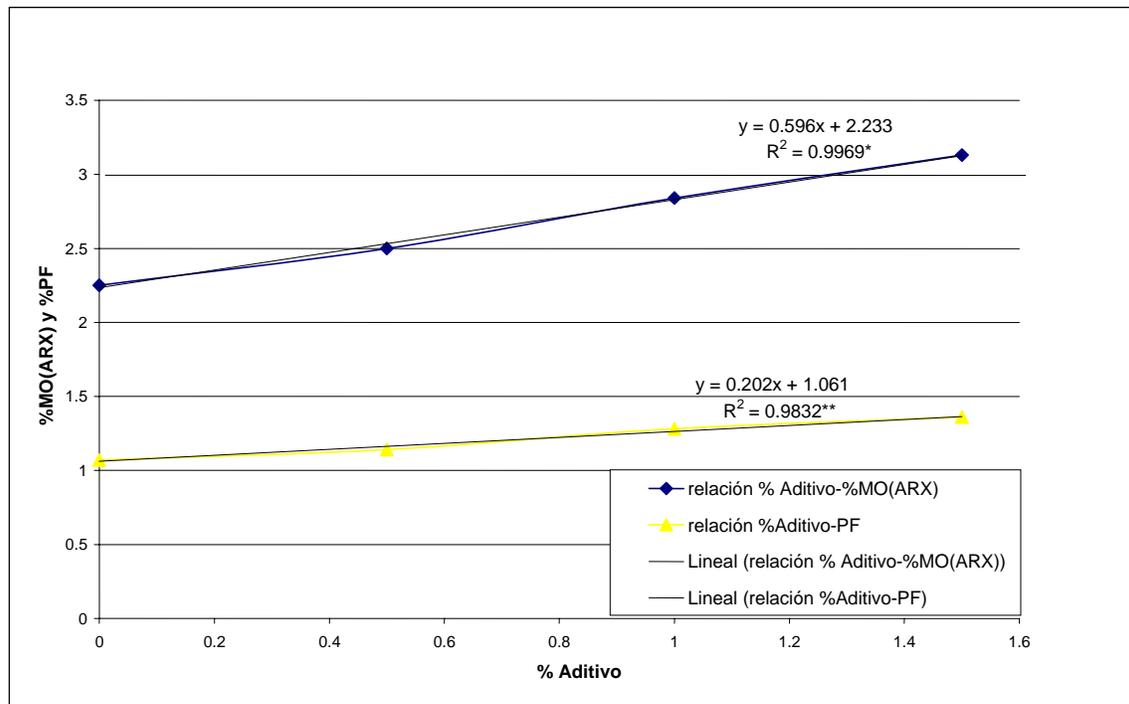
Porcentaje de composición química y Perdida al Fuego (PF) de las muestras



La gráfica No. 5 representa la relación que hay entre las concentraciones de MO, éste determinado por el análisis por rayos X, y el porcentaje de sustitución con aditivo. Además se muestra la relación entre el porcentaje de pérdida al fuego, determinado gravimétricamente, y el porcentaje de sustitución con aditivo.

Gráfica No.5

Relación entre MO (ARX) y PF con % de sustitución con Aditivo

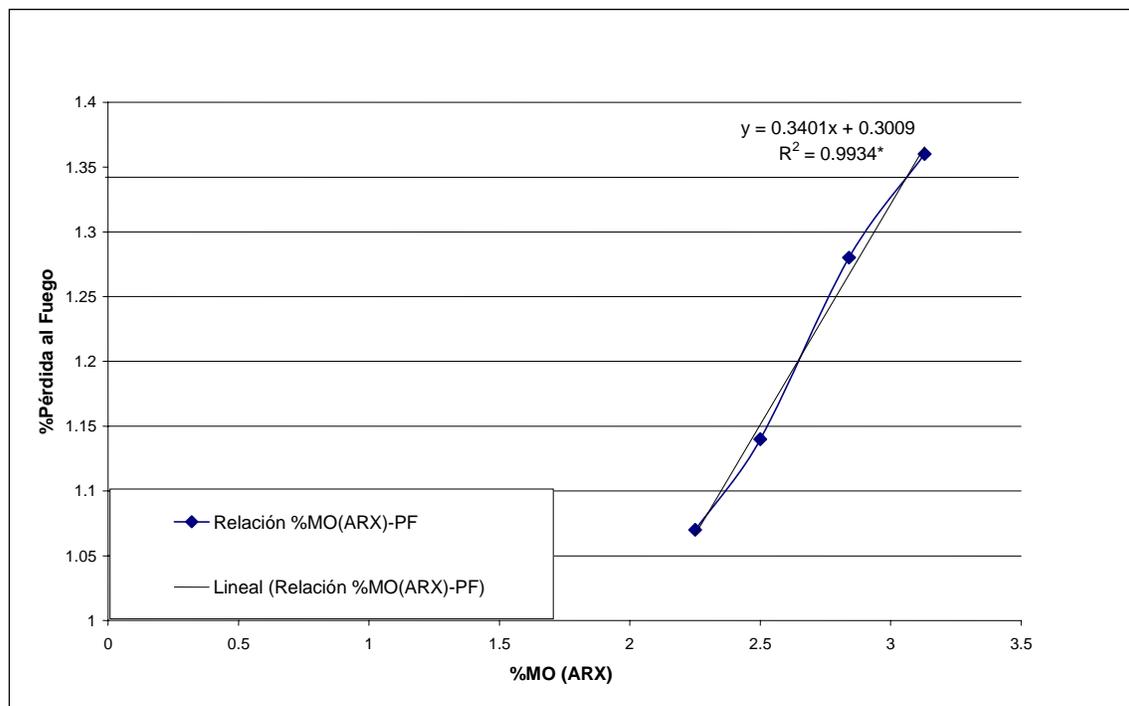


* = Significancia estadística, valor $P= 1.550 \cdot 10^{-3}$ ** = Significancia estadística, valor $P= 8.421 \cdot 10^{-3}$

La Gráfica No. 6 ilustra la relación entre el porcentaje de MO determinado por Análisis con rayos X y el porcentaje de la pérdida al fuego.

Gráfica No.6

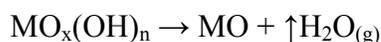
Relación entre MO (ARX) y Pérdida al Fuego



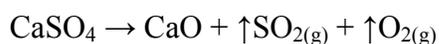
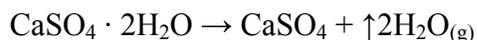
* = Significancia Estadística, Valor $P = 3.314 \times 10^{-3}$

9. DISCUSIÓN

Como se puede apreciar en la Tabla No. 1 se analizó por medio de la técnica de espectrofotometría de fluorescencia de rayos X la muestra de cemento control utilizada, también se analizó el aditivo utilizado pero no se revela su composición debido a que es información protegida. La principal diferencia entre estas muestras radica en el porcentaje de pérdida al fuego donde la muestra de aditivo tiene un valor mucho mayor al del cemento. Este resultado se debe ya que el aditivo se constituye principalmente del compuesto $MO_x(OH)_n$, donde M es un metal x y n son números reales. Este compuesto al someterse a altas temperaturas se deshidrata y la pérdida del agua representa la pérdida de peso.



En cambio, la pérdida del cemento es menor ya que el cemento se constituye principalmente de clinker y este material se genera del calentamiento de materia prima a una temperatura de $1450^\circ C$, la pérdida presentada se debe a los otros elementos que constituyen al cemento, los cuales son aditivos y un bajo porcentaje de yeso (aprox. 1%). En donde el yeso también se deshidrata y pierde óxido de azufre (2, 3, 5).



Las muestras de puzolana utilizadas tienen diferentes cantidades de aditivo. En la Tabla No.2 se ordenan las muestras en orden creciente de sustitución de puzolana por aditivo (Puzolana con 0% aditivo (PA 0) \rightarrow Puzolana con 1.5 aditivo (PA 1.5)), también se puede observar cómo aumenta respectivamente la cantidad de MO en dicha tabla, esto se demuestra claramente en la Grafica No. 4. Este aumento de MO corresponde al aumento de aditivo a la puzolana ya que el aditivo se compone principalmente de MO, en un

73.73%. En cambio la puzolana sin aditivo se compone de un 2.25% del mismo MO (muestra PA 0), de aquí se manifiesta el aumento de MO conforme al aumento de aditivo. Se observa un aumento en la pérdida al fuego (%PF), y dicha pérdida corresponde a la creciente cantidad de aditivo donde puede compararse contra el bajo valor de la puzolana sin aditivo (ver muestras PA 0 a PA 1.5 de Tabla No. 2), esto se debe al alto valor de %PF (23.8) manifestado por el aditivo.

La Gráfica No. 1 indica que las cuatro muestras de puzolana utilizada tienen la misma composición granulométrica, esto quiere decir que tienen la misma distribución de tamaño de partícula, debido a que se tuvo cuidado durante el proceso de molienda procurando obtener la misma fineza en las muestras. Por lo tanto si hay cambios en la actividad hidráulica no se debe a la granulometría de la muestra, ya que se conoce que los cambios en composición granulométrica pueden tener un efecto en la actividad hidráulica de varios materiales (3, 17, 19).

El Peso Específico de las muestras de puzolana es igual en todas las muestras (ver Tabla No. 3), esto se debe a que tienen la misma composición granulométrica y se utilizó la misma cantidad de puzolana para preparar los morteros correspondientes, se obtuvo el Flow dentro de lo especificado según la metodología citada (ver Sección 6.5.4 y 6.5.6.2). Por lo tanto, se hizo posible la elaboración de cubos para determinar la resistencia a compresión a diferentes edades de curado. Es importante tener el mismo peso específico en las muestras debido a que estos manifiestan cambios irregulares en la actividad hidráulica (2, 4, 14). Consecuentemente se calculó (ver Sección 6.5.6.3) la Actividad Hidráulica para las muestras de puzolana a los distintos tiempos de curado (ver Tabla No.4).

Debido a razones de confidencialidad, no se publican resultados de resistencias, sin embargo se realizó todo el procedimiento según el protocolo establecido y se obtuvieron resultados donde se manifiesta un aumento en la resistencia a los veintiocho días de curado en las muestras de puzolana conforme aumenta la cantidad de aditivo. Sin embargo, estas muestras tienen resistencias menores respecto a la del mortero de cemento control, esto debido a que este mortero es libre de puzolana y aditivo, esto quiere decir que se compone

en su mayoría sólo de clinker (el principal material hidráulico del cemento), por lo tanto en las resistencias no se diferencia bien qué material aumentó su hidraulicidad con la adición de aditivo. Por estas mismas razones se calcula la Actividad Hidráulica el cual es un índice porcentual (ver Sección 6.5.6.3) que muestra y contrasta de mejor forma el comportamiento hidráulico de un material (ver Gráficas No. 2 y 3). Además al disminuir el tiempo de curado cuesta aún mas diferenciar el efecto de la adición alcalina del aditivo.

Se puede observar en la Gráfica No. 2 que la actividad hidráulica de las muestras de puzolanas, a los tres días de curado, van aumentando conforme aumenta el porcentaje de sustitución con aditivo, excepto la muestra con un 1.5% de aditivo, esta muestra tiene una actividad menor a la de la muestra con 1% de aditivo. A los siete días de curado se observa el mismo comportamiento en la actividad con la diferencia importante de que la muestra con mayor sustitución de aditivo (1.5%) presentó la menor actividad de todas. Ahora en el caso de la actividad a los veintiocho días, a diferencia de los otros tiempos de curado, se observa que ésta acrecienta conforme aumenta el porcentaje de sustitución con aditivo en todas las muestras. También se presenta una disminución en la actividad hidráulica a los siete días de curado, este comportamiento es típico de algunos materiales puzolánicos. Se ha determinado que algunos materiales puzolánicos (ceniza volante, escoria granulada de alto horno, tobas, humo de sílice y otros), en forma de cementos puzolánicos, varían en la velocidad de adquisición de resistencia con respecto a un cemento sin puzolana como material cementante, en este caso el mortero de cemento control. Esto es debido a la menor velocidad de hidratación que se genera al emplear puzolanas, en especial si las temperaturas de curado son menores a 35°C (2, 3, 5). Por lo tanto la muestra con 1.5% de aditivo tuvo una gran disminución en la actividad hidráulica (menor que todas las muestras) a los siete días de curado y resultó en la que presentó la mayor actividad a los veintiocho días. *Es debido a este comportamiento que la hipótesis se planteó tomando en cuenta solo la actividad hidráulica a los veintiocho días de curado.*

La actividad hidráulica, a los veintiocho días de curado, aparece como una variable que es directamente proporcional al porcentaje de sustitución con aditivo, ya que el coeficiente de correlación entre estas variables es de $r^2 = 0.96$ donde el análisis de varianza

dio la significancia estadística, valor P de 0.0226, consecuentemente se manifiesta un comportamiento lineal entre ambas propiedades (ver Gráfica No.3 y Tabla No.4). En el caso de la actividad a los tres y siete días no hay tal comportamiento, presentándose valores de r^2 menores a 0.3 y de P mayores a 0.46. La razón de este comportamiento se expuso en el párrafo anterior.

Para justificar el hecho de que la actividad hidráulica aumentó a los veintiocho días debido al aumento de aditivo en la puzolana, se respalda no sólo en el hecho de que se prepararon las muestras de puzolana con el porcentaje correspondiente de aditivo, lo cual se determinó gravimétricamente en balanza analítica, sino también se puede observar las diferencias en la composición química de las puzolanas en la Tabla No. 2 y Gráfica No. 4. Donde el aumento de aditivo conlleva un aumento de MO, determinado por el análisis por rayos X (ARX) y también conlleva un aumento en el porcentaje de pérdida al fuego, ambas propiedades reflejan la cantidad de aditivo en la muestra. Esto se debe a la deshidratación del aditivo generando el óxido metálico y a la deshidratación del yeso.

La Gráfica No. 5 muestra la relación que hay entre el % Aditivo y el %MO (ARX) presente en las muestras. Se obtuvo una relación lineal con un coeficiente de correlación bastante alto ($r^2 = 0.997$), este coeficiente respalda los anteriores argumentos, indicando y confirmando que un aumento de aditivo (en las muestras de puzolana) es el responsable de un aumento en el %MO (ARX). A dicha regresión se le realizó un análisis de varianza proporcionando significancia estadística, con un valor $P = 1.550 \cdot 10^{-3}$. Igual es en el caso de la relación entre el % Aditivo y la pérdida al fuego, de la cual se obtuvo una relación lineal con un coeficiente de correlación alto ($r^2 = 0.98$; $P = 8.424 \cdot 10^{-3}$), confirmando que el aumento de aditivo (en las muestras de puzolana) deriva un aumento en la pérdida al fuego.

Se estableció una relación entre el porcentaje de aditivo y la pérdida al fuego (ver Gráfica No.6), se presentó una relación lineal entre ambas propiedades con un coeficiente de correlación alto ($r^2=0.99$) donde el análisis de varianza dio la significancia estadística, valor P de $3.314 \cdot 10^{-3}$. Esta relación indica que, para la puzolana específicamente usada en

este estudio, el aumento de la pérdida al fuego es proporcional a un aumento en el MO presente en cada muestra.

Como la caracterización, análisis químico, de las muestras de puzolana no presentan diferencias significativas en otros parámetros mas que en MO y debido a las relaciones anteriormente establecidas; se infiere que el aumento de la pérdida al fuego se debe al mayor porcentaje de MO, en la puzolana utilizada, donde este aumento en MO es causado exclusivamente por la mayor cantidad de aditivo presente en la muestra. Intuitivamente se establece que el aumento en la pérdida al fuego se debe únicamente a la deshidratación del aditivo, conllevando al aumento respectivo en MO. Por lo tanto, el aumento de aditivo es el responsable de estos cambios químicos (%MO) y físicos (%PF) en las muestras de puzolana.

De mayor importancia y objetivo de esta investigación es el hecho de que el aditivo tuvo un efecto sobre la resistencia a compresión desarrollada por los morteros elaborados con cemento puzolánico. Esto quiere decir que la actividad hidráulica aumentó como consecuencia del aditivo agregado, o sea este activó químicamente a la puzolana debido a que aumentó la hidráulica de este material, lo cual se manifiesta en los resultados obtenidos.

Debido a que la activación que ejerce el aditivo sobre la actividad hidráulica de los morteros, se manifestó hasta los veintiocho días de curado, se estima que el aditivo, y la puzolana que activa, contribuye a la hidratación de C_2S , ya que este es el principal responsable del desarrollo de resistencia a compresión a edades tardías (≥ 28 días) (2, 3, 5, 23-25). Sin embargo, no se cuentan con datos a mayores tiempos de curado. Esto también explicaría la baja actividad hidráulica a los tres y siete días.

10. CONCLUSIONES

- 10.1** Existe una relación lineal entre el porcentaje de actividad hidráulica y el porcentaje de aditivo agregado como activante en los morteros endurecidos de cemento Pórtland. Conforme aumenta el porcentaje de aditivo, aumenta la actividad hidráulica a los veintiocho días de curado
- 10.2** El aumento en la pérdida al fuego en la puzolana se debe a la mayor concentración de aditivo en la puzolana y a la eliminación de agua del mismo.
- 10.3** El aditivo alcalino hidratado tiene un efecto químico activante positivo sobre la puzolana.
- 10.4** No existe relación lineal entre el porcentaje de actividad hidráulica y el porcentaje de aditivo agregado como activante en los morteros endurecidos de cemento Pórtland a los tres ni a los siete días de curado.

11. RECOMENDACIONES

- 11.1 Realizar un estudio sobre el efecto de la activación química, con el aditivo alcalino hidratado (mismos porcentajes de sustitución), de las puzolanas en morteros endurecidos de cemento a edades tardías (28, 56 y 140 días) de curado.
- 11.2 Realizar un estudio sobre el efecto en la actividad hidráulica, con el aditivo alcalino hidratado, o utilizar en combinación con otros aditivos, a diferentes porcentajes de sustitución (con valores intermedios a los utilizados en este estudio), de las puzolanas en morteros endurecidos de cemento.
- 11.3 Validar un método gravimétrico donde se determine la cantidad de Silicatos de Calcio Hidratados (CSH) como un porcentaje de agua retenido en morteros endurecidos a distintas edades. A su vez tratar de utilizar esta información para deducir las proporciones de C_2S y C_3S según la resistencia o actividad hidráulica presentada por diferentes muestras a diferentes edades de curado. Este método (validado) a su vez complementaría estudios como el presente o los anteriormente sugeridos.
- 11.4 Validar un método para determinar $MO_x(OH)_n$ en clinker, puzolana y/o cemento según el porcentaje en la pérdida al fuego y la cantidad de $MO(ARX)$. Se sugiere también realizar un estudio termogravimétrico.
- 11.5 Validar un método para determinar Yeso en cemento según el porcentaje en la pérdida al fuego y la cantidad de $MO(ARX)$ y $SO_3(ARX)$. Se sugiere también realizar un estudio termogravimétrico.

12. REFERENCIAS

1. Cohen, M.D.; Mather, B. Sulfate attack on Concrete-Research Needs. ACI Material Journal, Vol. 88, num. 1, enero-febrero, 1991, pp. 62-69.
2. MacLaren, D.; White, M. Cement: its chemistry and properties. Journal of Chemical Education. Vol. 80. No. 6. Junio, 2003. pp. 623-634.
3. Williams, Frederick. Razonamiento Estadístico. 2da. Edición. Nueva Editorial Interamericana. Mexico. 1982.
4. Hewlett C. Peter. Lea's Chemical of Cement and Concrete. Fourth Edition. Arnold publishers. United Kingdom. 1998,pp. 25-38.
5. Holderbank. Cement Seminar: Material Technology 1. Switzerland. 1995. Section 13.
6. Bogue, R. H. Chemistry of Portland Cement. Rhinehold: New York. 1947: Ver: <http://www.buildbyte.com/grasim/ceoscorner2.html> [Con acceso el 19-8-2005, 21:17hrs.]
7. [http://www.ArqCon.com.ar/ArqCon Arquitectura y Construcción.htm](http://www.ArqCon.com.ar/ArqCon%20Arquitectura%20y%20Construcci%C3%B3n.htm). [Con acceso el 22-9-2005, 19:37hrs.]
8. Soria Santamaria, F. Panorama de los cementos puzolánicos en el futuro: Cementos PAS-PUZ. En: Monografías del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento.Vol. 270; p 1-60. 1968.
9. Tobon, J. I. Puzolanas en los alrededores de IRRA. Dyna, 129. 2000,pp, 77-83. Ver: <http://www.minas.unalmed.edu.co/facultad/publicaciones/dyna/129/puzolanas.pdf> [Con acceso el 10-9-2005, 23:02hrs.]

10. 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. Section 4, Volume 4.01, 1989, pp.296-298.
11. V. M. Malhotra and Kumar Metha, Pozzolanic and Cementitious Materiales., Gordon and Breach Publishers. 1996, preface. Creto., IMCYC. 1998, pp. 228.
12. Valdez, P.; Das Roy, T.; Rivera, R. Evaluacion de la velocidad de hidratacion en sistemas puzolanas naturales-portlandita. Ciencia UANL, Vol. VII, No. 2, Abril-Junio, 2004. pp.190-195.
13. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (ICONTEC). Ensayo Químico para Determinar la Actividad puzolánica. Norma 1512. 1979. Ver: <http://www.minas.unalmed.edu.co> [Con acceso el 13-9-2005, 00:07hrs.]
14. 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, pp. 192-197.
15. ASTM C 109-01. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2 in. or 50 mm Cube Specimens). Section 4, Volume 4.01, 2002, pp. 83-88.
16. Payá, J; Monzó, M.; Borrachero, M.; Serna, P.; Velásquez, S; Ordóñez, L. El factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silicoaluminosas muy reactivas. *VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos*, Gandía 2002. pp. 591-600. Ver: http://www.upv.es/pms2002/Comunicaciones/037_PAYA.PDF
17. ASTM C 109-01. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. Section 4, Volume 4.01, 2002, pp. 97-92.

18. Skoog, D. et. Al. Principios de Análisis Instrumental. Quinta Edición. Editorial Mc Graw – Hill. 2001. pp. 308-314.
19. ASTM C 114-05. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. Section 4, Volume 4.01, 2002, pp.29-42.
20. Rassk, E.; Bhaskar, M. C. Pozzolanic activity of pulverized fuel ash. Cem.Concr.Res (5) (1975) 363-376.
21. Luxán, M.; Madruga, F.; Saavedra, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. Cem.Concr.Res (19) (1989) 63-68.
22. S. Sugita, M. Shoya, H. Tokuda, Evaluation of pozzolanic activity of rice husk ash, Proceedings of the 4th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Amer. Concr. Inst., Detroit, USA, vol. 1, 1992, pp.495- 512 (ACI SP-132).
23. S. Sugita, Q. Yu, M. Shoya, Y. Tsukinaga, Y. Isojima, Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement in: H. Jutnes, A.B. Amrkai (Eds), Gothenborg, Vol 3 (1997) (3ii 109).
24. C.Tashiro, K.Ikeda, Y. Inoue, Evaluation of pozzolanic activity by the electric resistance method, Cem.Concr.Res (24) (1994) 1133-1139.
25. Suesta, C.; Tendero, M.; Beleña, I. Activación alcalina de humo de silice en morteros de cemento: Estudio de resistencias mecanicas. VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandía 2002. pp. 739-747.
26. V. Kind, V.F. Zhuralev, Electrical conductivity of setting Portland cements, Tsement (5) (1937) 21-26.

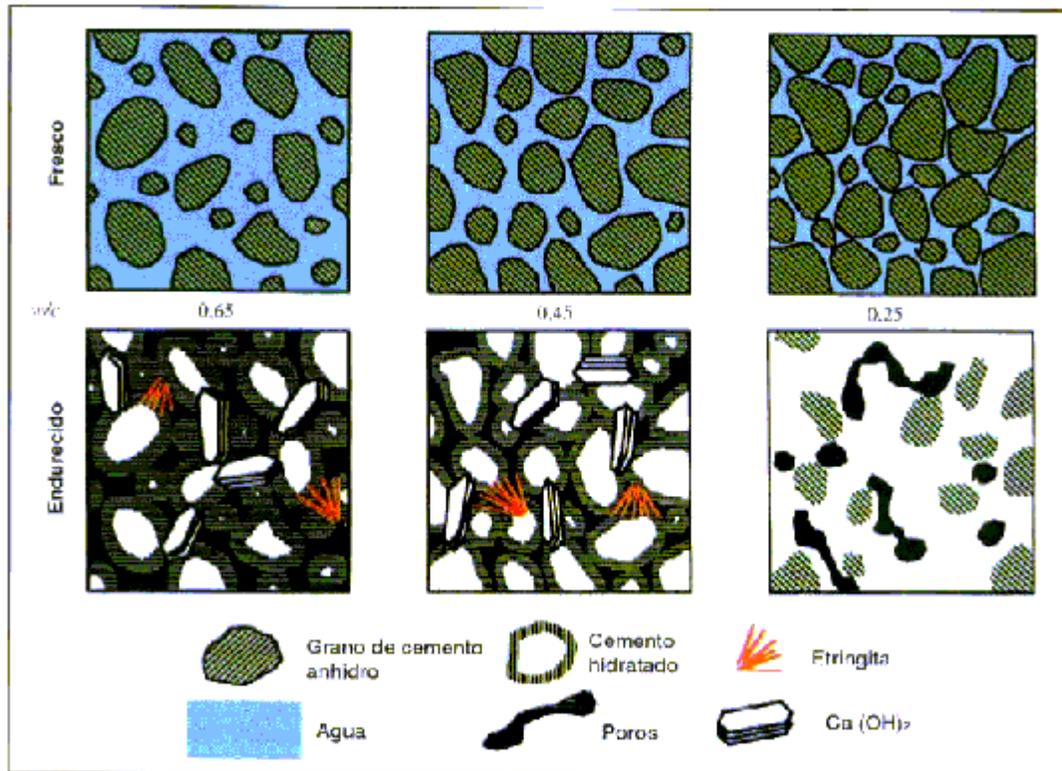
27. A. Bezjak, V. Alujevic, A kinetic study of hydrothermal reactions in C₂S-Quartz system: I. Determination of rate constants for processes with two acceleration periods, Cem.Concr.Res. **(11)** (1981) 19-27.
28. V. Alujevic, A. Bezjak, A kinetic study of hydrothermal reactions in C₂S-Quartz system: II. Influence of granumometry of quartz and the treatment of samples, Cem.Concr.Res. **(13)** (1983) 34-40.
29. P.R. Khangaonkar, A. Rahmat, K.G. Jolly. Kinetic study of the hydrothermal reaction between lime and rice-husk-ash silica. Cem.Concr.Res. **(22)** (1992) 577-588.
30. C. Shi, R. Day. Pozzolanic reaction in the presence of chemical activator. Part I. Reaction Kinetics. Cem.Concr.Res. **(30)** (2000) 51-58.
31. R. Kondo, K. Lee, M. Diamond. Kinetics and Mechanism of hydrothermal reaction in lime-Quartz-Water systems. Journal of Ceramic Society (Japan) **(84)** (1976) 573-578.
32. Villar, E. Gonzalez, R. Hernandez, J. Concrete blocks with the addition of vulcanized-rubber fibers. Cem.Concr.Res. **(33)** (2001) 61-78.
33. Smith, J. M. Ingeniería de la Cinética Química, Eds. Continental, México (1991).
34. Ramachandran, V.S. Concrete Admixture Handbook. Properties, Science and Technology. Noyes Publications. P 304
35. Daugherty, K. E.; et. al. Why Concrete. Journal of Chemical Education. 1972, 49, 522.
36. <http://www.ingenieroambiental.com.ar> [Con acceso el 16-9-2005, 23:42hrs.]
37. The Environmental Council of Concrete Organizations. Ver: <http://www.ecco.org> [Con acceso el 5-4-2006, 09:07hrs.]

38. The Environmental Protection Agency. Ver: <http://www.EPA.gov> [Con acceso el 15-8-2005, 19:37hrs.]

39. Robertson, L. D. Heavy Metal Concrete. Journal of Chemical Education. Vol. 83 No. 10 October 2006. (1421-1422)

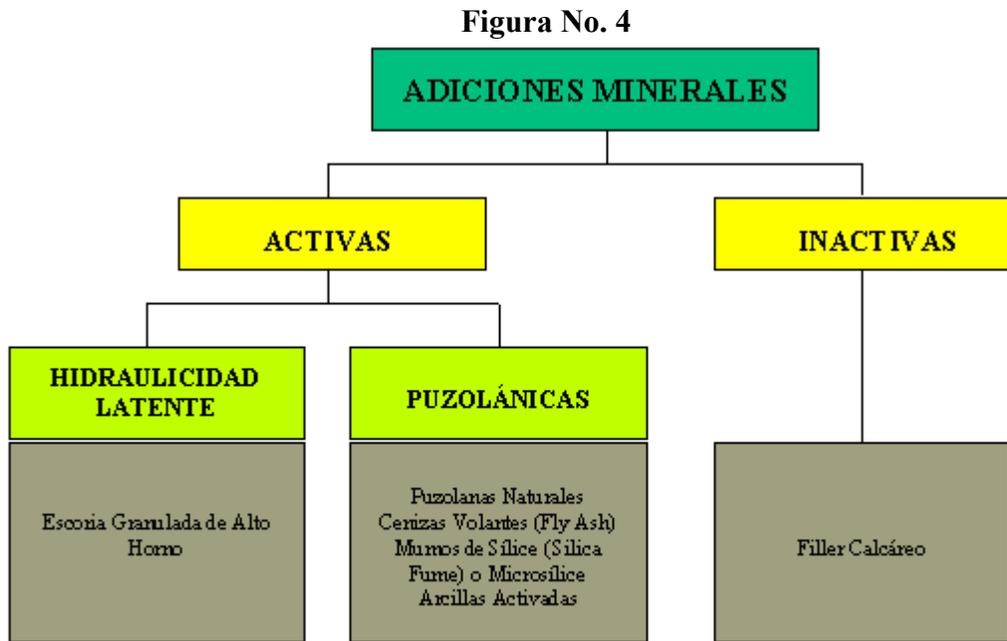
13. ANEXOS

Figura No. 3



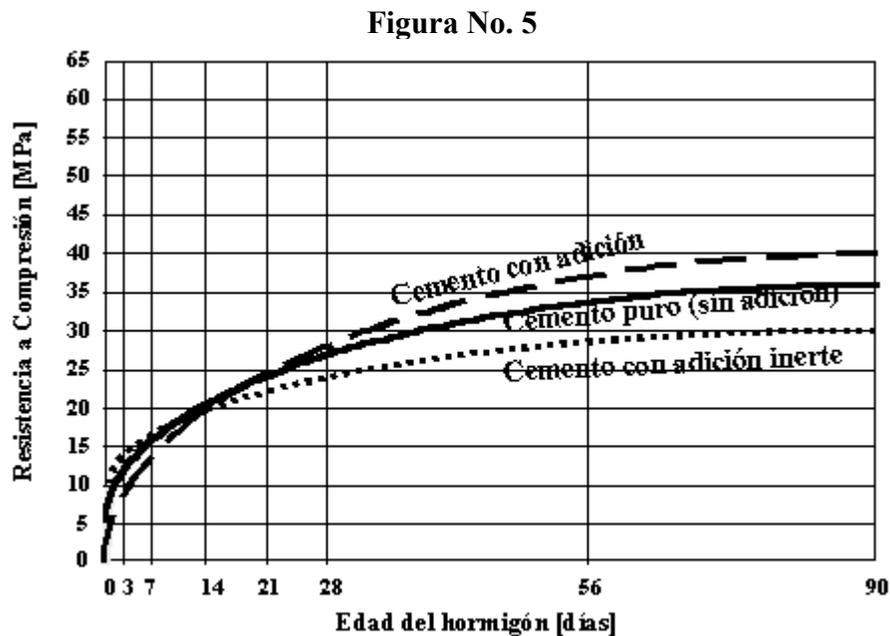
Composición de la pasta de cemento, en estado fresco y endurecido para diferentes relaciones a/c

Fuente: [http://www.ArqCon.com.ar/ArqCon Arquitectura y Construcción.htm](http://www.ArqCon.com.ar/ArqCon%20Arquitectura%20y%20Construcci%C3%B3n.htm).



Clasificación de las adiciones minerales.

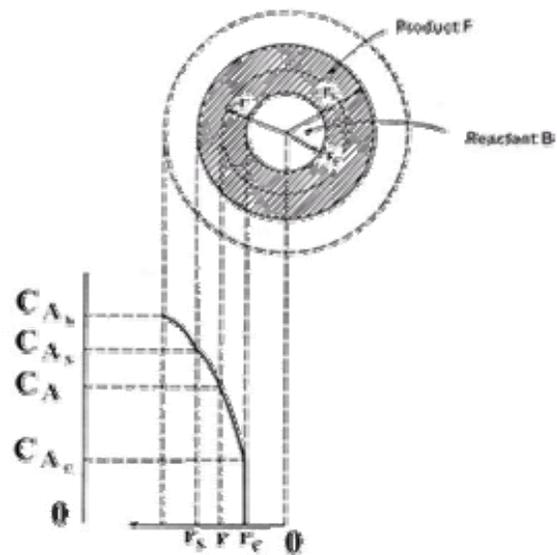
Fuente: [http://www.ArqCon.com.ar/ArqCon Arquitectura y Construcción.htm](http://www.ArqCon.com.ar/ArqCon%20Arquitectura%20y%20Construcci3n.htm).



Influencia de las adiciones sobre el desarrollo de resistencia del hormigón.

Fuente: [http://www.ArqCon.com.ar/ArqCon Arquitectura y Construcción.htm](http://www.ArqCon.com.ar/ArqCon%20Arquitectura%20y%20Construcci3n.htm).

Figura No. 6



Esquema de los perfiles de concentraciones acorde con el Modelo del Núcleo Menguante (MNM)

Fuente: <http://www.buildbyte.com/grasim/ceoscorner2.html>