

**SINTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECHANICAS  
DE GEOPOLIMEROS A PARTIR DE PUZOLANA PARA SU APLICACIÓN EN  
LA INDUSTRIA**

**HERNANDO ALVAREZ MANTILLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICOQUIMICA  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2010**

**SINTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECHANICAS  
DE GEOPOLIMEROS A PARTIR DE PUZOLANA PARA SU APLICACIÓN EN  
LA INDUSTRIA**

**HERNANDO ALVAREZ MANTILLA**

**Proyecto de Grado para optar al titulo de Geólogo**

**DIRECTOR:**

**Ph. D. CARLOS RIOS REYES**

**Geólogo**

**COORDIRECTOR:**

**LUIS EDUARDO MORENO TORRES**

**Ing Ambiental**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE FISICOQUIMICA**

**ESCUELA DE GEOLOGÍA**

**BUCARAMANGA**

**2010**

## **AGRADECIMIENTOS**

Como autor de este trabajo le doy mis sinceros agradecimientos a:

Profesores Carlos Alberto Ríos (Director) y Luis Eduardo Moreno (Codirector) quienes con sus conocimientos y aportes direccionaron este proyecto.

Geólogo Orlando Ardila, Andina Ingeniería L.T.D.A. por su colaboración a lo largo de todo el proyecto y aporte intelectual en el desarrollo de esta investigación.

Todo ellos y en general a todas las personas que influyeron directa o indirectamente en el desarrollo de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION	1
1. OBJETIVOS	3
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2. MARCO TEORICO	4
2.1 GEOPOLÍMEROS	4
2.1.1 Historia Y Aplicación De Los Geopolímeros	4
2.1.2 Estructura Química Y Propiedades De Los Geopolímeros	8
2.1.3 Química De La Geopolimerización	10
2.1.4 Efecto Del Silicato Soluble	14
2.1.5 El Efecto De Los Cationes (Na, K, Ca)	16
2.1.6 El Efecto De La Temperatura De Curado Y Tiempo De Envejecimiento	17
2.1.7 Reacción De Geopolimerización	18
2.1.8 Ventajas Y Desventajas De Los Geopolímeros	20
2.1.9 Parte Ambiental	21
2.1.9.1 Cemento y Contaminación.	21
2.1.9.2 Materiales Alternativos:.	22
2.1.9.3 Materiales Puzolánicos:	23
2.1.9.4 Materiales Artificiales.	24
2.1.9.5 Esquema y ventajas de estos materiales:	25
2.2. CEMENTO	28
2.2.1 Definición	28
2.2.2 Producción Del Cemento Portland	29
2.2.3 Tipos de cemento	29
2.2.4 Composición Química Del Cemento	31

2.2.5 HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND	31
2.3 LAS PUZOLANAS	33
2.3.1 Origen De Las Puzolanas	33
2.3.2 Definición de Puzolana	34
2.3.3 Clasificación De Las Puzolanas Según Su Origen	34
2.3.3.1 Las puzolanas naturales:	34
2.3.3.2 Puzolanas artificiales:	35
2.3.3.3 Puzolanas mixtas o intermedias:	36
2.3.4 Aplicación De Las Puzolanas En El Cemento Portland Ordinario	37
2.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	40
3. PARTE EXPERIMENTAL	42
3.1 MATERIALES Y EQUIPOS	42
3.2 METODOLOGÍA	43
3.2.1 Desarrollo Experimental	43
3.2.2 Preparación De Los Materiales	44
3.2.2.1 Puzolana	44
3.2.2.2 Arena:	45
3.2.2.3 Hidróxido De Sodio (Soda Caustica)	45
3.2.2.4 Silicato De Sodio Neutro 42:	45
3.2.3 Caracterización De Los Materiales De Partida	46
3.2.3.1 Análisis granulométrico:	46
3.2.3.2 Análisis Mineralógico Por Difracción De Rayos X:	47
3.2.3.3 Determinación Del Peso Específico:	47
3.2.3.4 Determinación De La Finura	48
3.2.3.5 Presencia De Materia Orgánica (Azul De Metileno):	48
3.2.4 Diseño De La Mezcla	49
3.2.4.1 Mortero De Cemento Portland (De Referencia):	50
3.2.4.2 Mortero Geopolimérico:	51
3.2.5 Elaboración De Probetas	52

3.2.6 Ensayos Realizados A Las Probetas	54
3.2.6.1 Resistencia A La Compresión	54
3.2.6.2 Ataque Con Ácidos:	55
3.2.6.3 Ataque Con Sulfatos:	56
3.2.6.4 Comportamiento A Altas Temperaturas	56
3.2.6.5 Porosidad	57
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
4.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A LOS MATERIALES	58
4.1.1 Puzolana	58
4.1.1.1 Análisis Mineralógico (DRX):	58
4.1.1.2 Peso Específico:	59
4.1.1.4 Finura	60
4.1.2 Arena	61
4.1.2.1 Análisis Granulométrico	62
4.1.2.2 Análisis mineralógico (DRX):	63
4.1.2.3 Peso específico y absorción de agregados finos	64
4.1.2.4 Cantidad de materia orgánica:	66
4.1.3 Cemento	67
4.1.3.1 Peso específico	67
4.1.3.2 Finura	68
4.2 RESULTADOS ENSAYOS A LAS PROBETAS	69
4.2.1 Resistencia A Compresión	69
4.2.2 Resistencia A Altas Temperaturas	71
4.2.3 Ataque Con Sulfatos	74
4.2.4 Ataque Con Ácidos	78
4.2.5 POROSIDAD	81
5. CONCLUSIONES	82

RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFIA	85
ANEXOS	91

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: (a) una estructura semiesquemática para el Na-PSS por Barbosa et al. (2000) y (b) Un modelo de Na-PSS de Davidovits (1991). Los átomos marcados de Si indican el Q4 (2AL) y Q4 (3AL), respectivamente, donde "4" hace referencia a la estructura tetraédrica Si-O, y numero antes del Al hace referencia al número de átomos de Al vecinos al tetraedro de Si-O.	11
Figura 2: La posible reacción en vías de la geopolimerización La descripción de cada símbolo se presenta en la tabla 2 y los "Kn"s representan las constantes cinéticas de las reacciones individuales.	13
Figura 3: Tipos de polisalatos	19
Figura 4: Esquema de la reacción de geopolimerización.	20
Figura 5. Composición química aproximada de los materiales alternativos empleados en construcción	23
Figura 6. Resistencia a la compresión de diversos sistemas cementosos.	28
Figura 7: Representación esquemática del desarrollo experimental.	43
Figura 8: Equipo utilizado para la preparación de la puzolana.	44
Figura 9: Procedimiento de preparación de las probetas.	53
Figura 10. Ensayo de resistencia.	55
Figura 11. Exposición de los especímenes a altas temperaturas.	57
Figura12. Método para determinar la porosidad y densidad	57
Figura 13. Foto puzolana	58
Figura 14. Análisis mineralógico de la puzolana	59
Figura 15. Método de ensayo para determinar la finura de la puzolana	60
Figura 16. Foto arena	61
Figura 17. Análisis granulométrico de la arena.	63
Figura 18. Análisis mineralógico de la arena.	64
Figura 19. Foto del cemento	67

Figura 20. Determinación de la finura del cemento por el tamiz 200	68
Figura 21. Resistencia a la compresión de los morteros	70
Figura 22. Resistencia a la compresión a altas temperaturas.	72
Figura 23. Pérdida de peso de las probetas por las altas temperaturas expresado en porcentajes.	74
Figura 24. Resistencia a la compresión por el ataque con sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ).	76
Figura 25. Gráfica de los valores estimados de la resistencia a la compresión a los 21 días de curado.	76
Figura 26. Diagrama donde se muestra la pérdida de resistencia al ataque con $MgSO_4$	77
Figura 27. Resistencia a la compresión al ataque con $H_2SO_4$ .	79
Figura 28. Diagrama donde se muestra la pérdida de resistencia al ataque con $H_2SO_4$	80

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Clasificación de las estructuras de polisialatos con sus respectivas aplicaciones	9
Tabla 2: La descripción de los símbolos.	14
Tabla 3. Características generales de los materiales puzolánicos	24
Tabla 4. Cementos substituidos a base de cementos portland	26
Tabla 5. Cementos generados con residuos químicamente activados	27
Tabla 6. Composición química típica de las puzolanas volcánicas	35
Tabla 7. Composición química típica de las puzolanas sedimentarias orgánicas	37
Tabla 8. Propiedades físicas del NaOH	45
Tabla 9. Ficha técnica	46
Tabla 10: Cantidad de materiales de cemento portland	50
Tabla 11: Ensayos y número de probetas realizados de CPO	51
Tabla 12: Ensayos y número de probetas realizados de cemento geopolimérico.	52
Tabla 13. Fase mineralógica de la puzolana	58
Tabla 14. Análisis granulométrico por tamizado de la arena	62
Tabla 15. Gradación permisible	62
Tabla 16. Composición mineralógica de la arena	63
Tabla 17. Cálculos para determinar el peso específico y la absorción de agregados finos.	65
Tabla 18. Valor de azul de metileno y el comportamiento esperado de la arena.	67
Tabla 19. Promedio aritmético de la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas.	69
Tabla 20. Comparación de resistencias a compresión expresada en (%)	71
Tabla 21. Promedio de la resistencia a la compresión de las diferentes probetas sometidas a altas temperaturas.	71

Tabla 22. Pérdida de resistencia a la compresión por las altas temperaturas, tomando como referencia las resistencias a los 28 días de curado de la tabla 19.73	
Tabla 23. Pérdida de peso	74
Tabla 24. Promedio de la resistencia a la compresión de las diferentes probetas sometidas a ataque con MgSO <sub>4</sub> .	75
Tabla 25. Valores de resistencia a la compresión estimados a los 21 días de curado.	76
Tabla 26. Porcentajes de la pérdida de resistencia a la compresión por el ataque con MgSO <sub>4</sub>	77
Tabla 27. Porcentaje de pérdida de peso por el ataque con MgSO <sub>4</sub> .	77
4.2.4 Ataque Con Ácidos	78
Tabla 28. Promedio de la resistencia a la compresión de las diferentes probetas sometidas a ataque con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	78
Tabla 29. Porcentaje de la pérdida de resistencia a la compresión en la novena semana.	79
Tabla 30. Porcentaje de pérdida de peso por el ataque con ácido sulfúrico	80
Tabla 31. Porosidad y densidad de las probetas.	81

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO CON CEMENTO PORTLAND ORDINARIO DE 50 mm.	91
ANEXO B: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO CON OPC DE 50 mm A ALTAS TEMPERATURAS	92
ANEXO C: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO DE 50 mm SOMETIDOS AL ATAQUE CON MgSO <sub>4</sub>	93
ANEXO D: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO DE 50 mm SOMETIDOS AL ATAQUE CON H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	94
ANEXO E: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm T Amb	95
ANEXO F: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm A ALTAS TEMPERATURAS	96
ANEXO G: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm SOMETIDOS A MgSO <sub>4</sub>	97
ANEXO H: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm SOMETIDOS A ACIDO SULFURICO	98
ANEXO I: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm 65 C	99
ANEXO J: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm (65 C) A ALTAS TEMPERATURAS	100
ANEXO K: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO DE 50 mm SOMETIDOS A MgSO <sub>4</sub>	101
ANEXO L: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO DE 50 mm SOMETIDOS A ACIDO SULFURICO	102

## RESUMEN

**TITULO:** SINTESIS Y CARACTERIZACION DE LAS PROPIEDADES FISICOMECAICAS DE GEOPOLIMEROS A PARTIR DE PUZOLANA PARA SU APLICACION EN LA INDUSTRIA\*

**AUTOR:** Hernando Álvarez Mantilla\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Geopolímeros, puzolana, activación alcalina.

### **DESCRIPCIÓN:**

Las tendencias mundiales en la industria de la construcción y grupos de investigación se encaminan hacia el uso de materiales alternativos que favorezcan el desarrollo sostenible con una baja emisión de CO<sub>2</sub> y correcto aprovechamiento de los recursos naturales, acompañado de ventajas técnicas para su versatilidad en diferentes campos de aplicación

El presente trabajo consiste en la evaluación del desempeño de morteros geopoliméricos obtenidos a partir de la activación alcalina de una puzolana natural. Como activador alcalino para la producción de los morteros geopoliméricos se empleó hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración 8M y silicato de sodio semineutro 42 (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) con una relación molar de SiO<sub>2</sub>: NaO = 3.0. Los materiales cementantes fueron sometidos a pruebas de resistencia mecánica y de durabilidad, esta última con relación a su resistencia al ataque con ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y sulfato de magnesio (MgSO<sub>4</sub>), así como a altas temperaturas; la prueba de resistencia a la compresión se realizó hasta 80 días de curado y la de durabilidad hasta 9 semanas de estar inmersas en dichas soluciones.

Para todas estas pruebas se determinó la pérdida de peso y de resistencia a la compresión expresadas en porcentajes; finalmente se hace una comparación del desempeño de los morteros geopoliméricos a base de puzolana natural con respecto al desempeño de morteros preparados con cemento portland ordinario expuestos a las mismas condiciones.

Las pruebas realizadas a las probetas se llevaron a cabo siguiendo los procedimientos especificados en la Norma Técnica Colombiana ICONTEC NTC 220 "Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de mortero de 50 mm de lado"

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Alberto Ríos Reyes.

## ABSTRACT

**TITLE:** SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL GEOPOLYMERIC PROPERTIES FROM POZZOLAN FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS\*

**AUTHOR:** Hernando Álvarez Mantilla\*\*

**KEYWORDS:** geopolymer, pozzolan, alkali activation

**DESCRIPTION:**

Global trends in the construction industry and research groups are moving towards the use of alternative materials which promote sustainable development with low CO<sub>2</sub> emissions and proper use of natural resources, along with technical advantages in order to expand to different fields of application.

This work concerns the performance assessment of the geopolymeric mortars obtained from the alkaline activation of natural pozzolan.

Sodium hydroxide (NaOH) at an 8M concentration and sodium silicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) grade 42, with a molar ratio of SiO<sub>2</sub> to NaO equal to 3.0, were used as an alkaline activator for the production of geopolymeric mortars. The cementitious materials were tested for mechanical strength and durability, the latter in relation to its resistance to attack by sulfuric acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) and magnesium sulfate (MgSO<sub>4</sub>), as well as high temperatures. The test for compressive strength was conducted up to 80 days of curing, and the durability test took up to 9 weeks of immersion in such solutions.

The weight loss and the compressive strength were calculated for all the tests and the information was expressed as several percentages. Finally, the performance of the geopolymeric mortars from natural pozzolan was compared to the performance of ordinary Portland cement mortars subjected to the same conditions.

All tests were carried out according to the procedures specified in ICONTEC Colombian Technical Standard NTC 220 "Determination of the resistance for hydraulic cement mortars using 50 mm sideway mortar cubes"

---

\* Degree proyect

\*\* Physical / Chemical Engineering Faculty. School of Geology. Director: Carlos Alberto Rios Reyes

## INTRODUCCION

El cemento Pórtland ordinario (CPO), es uno de los materiales de construcción más empleados en la producción de concreto, debido fundamentalmente, a las excelentes propiedades mecánicas que presenta en estado endurecido. En la actualidad se estima que a nivel mundial se manufacturan anualmente alrededor de  $1.8 \times 10^9$  toneladas de cemento, cifra que se incrementa como consecuencia del crecimiento poblacional y con ello el desarrollo económico y social. Sin embargo, la producción del CPO es una de las practicas más contaminantes ya que cerca del 5% de la contaminación atmosférica es atribuida a la industria cementera, debido a la emisión de grandes volúmenes de contaminantes en el proceso de obtención del clínker, donde la producción de una tonelada de cemento libera cerca de una tonelada de  $\text{CO}_2$  y gases de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ , asociados a la descarbonatación de la caliza en el horno de clinkerización, así como a la quema de combustibles fósiles (Gartner, 2004).

La industria cementera, junto con grupos de investigación a nivel mundial, busca soluciones para la conservación y protección de los recursos no renovables mediante el desarrollo de materias primas y combustibles alternativos para el mejoramiento de los procesos de producción y calidad de los productos, enmarcado en las políticas de sostenibilidad de los diferentes acuerdos internacionales.

En este sentido, la sustitución parcial o total de cemento por diferentes tipos de geomateriales y subproductos industriales (tales como puzolanas, caolines, arcillas calcinadas, cenizas volantes, escorias de diferentes industrias metalúrgicas, desechos vítreos, lodos, entre otros) en las mezclas de materiales cementantes, ha dado lugar a los cementos compuestos, cementos portland de

bajo calor de hidratación (CBC) y los geopolímeros. En estos últimos las reacciones químicas a temperatura ambiente son promovidas por una solución alcalina la cual induce una o varias reacciones para obtener materiales cementantes con elevado desempeño mecánico y de durabilidad.

A este respecto, la elaboración de geopolímeros muestra ser muy promisoría para su aplicación en la industria cementera como alternativo al CPO. En términos del calentamiento global, la preparación de geopolímeros a base de materiales cementantes contribuye a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera sin sacrificios económicos.

Los requerimientos actuales tanto ambientales como técnicos han promovido que la comunidad científica a escala mundial se vincule en esta línea de investigación, a tal punto que se ha llegado a mencionar que sean los materiales cementantes del tercer milenio (Roy, 1994) y (Moranville, 1999).

Las puzolanas han venido siendo utilizadas como aditivo para la producción de cementos compuestos en mezclas de concreto con excelentes cualidades. Estas están compuestas básicamente por óxidos de Si y Al, poseen propiedades hidráulicas latentes y en general su naturaleza vítrea hace de estas materiales aptos para ser activados alcalinamente.

El siguiente trabajo de grado tiene por objeto llevar a cabo la preparación de geopolímeros a partir de la activación alcalina de una puzolana, con propiedades especiales, económicas y de alta calidad comparado con el CPO.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Llevar a cabo la caracterización de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros obtenidos a partir de la activación alcalina de puzolana.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar el uso de puzolana en la preparación de geopolímeros.
- Determinar la influencia de los parámetros experimentales en el proceso de geopolimerización para obtener un producto con potencial para su aplicación en la industria cementera.
- Caracterizar física y mecánicamente el material obtenido y compararlo con las propiedades fisicomecánicas del concreto tradicional.

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1 GEOPOLÍMEROS**

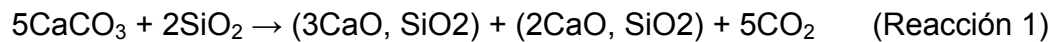
Los polímeros inorgánicos o geopolímeros son formados por redes 3D amorfas de tetraedros alternados de  $\text{AlO}_4^-$  y  $\text{SiO}_4$  de gran estabilidad térmica y química, no inflamables, con buenas prestaciones mecánicas y fácilmente procesables a temperaturas inferiores a 100 °C y presión atmosférica.

Geopolímero es un término acuñado por Joseph Davidovits en la década de los años 1980 para designar a polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización (Davidovits, 1988). Los geopolímeros también son conocidos como aluminosilicatos inorgánicos y tiene un elevado potencial para ser usados en numerosos campos, pero predomina el uso como sustitutos de cementos portland. Los geopolímeros tienen la ventaja de tener bajas emisiones de  $\text{CO}_2$  en su producción, una gran resistencia química y térmica, y buenas propiedades mecánicas, tanto a temperatura ambiente como a temperaturas extremas.

#### **2.1.1 Historia Y Aplicación De Los Geopolímeros**

El objetivo principal en la investigación y comercialización de la tecnología de los geopolímeros ha sido la necesidad de encontrar materiales alternativos para sustituir el CPO como material de construcción. Con la necesidad de una mayor producción para suplir el CPO, la necesidad de encontrar materiales alternativos se hace mayor. La calcinación de caliza (la principal roca en la producción de cemento) con minerales silicoaluminosos a altas temperaturas (1450-1500 °C)

producen gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) como subproducto (Ecuación 1); estudios han demostrado que por cada tonelada de cemento producida, 0.94 toneladas de CO<sub>2</sub> son generadas, que es 8 veces mayor que las emisiones resultantes de las actividades metalúrgica (Davidovits, 1994).



Sólo para la fabricación de cemento, las previsiones de emisión de gases de efecto invernadero se espera que aumenten un 6% anual entre 1988 y 2015 (Davidovits, 1994). Muchos programas están encaminados a ampliar el uso de materiales reciclables, mediante la mezcla de cementos con los productos minerales a fin de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Estos minerales son de origen natural, como la caolinita o caolinita calcinada (metacaolinita); o subproductos industriales, como escorias de altos hornos, hierro de la industria de acero, y cenizas volantes de la combustión de carbón. Estas mezclas de minerales se encuentran en más del 30% en peso de mezclas de OPC. Aparte de la sustitución de cemento con mezclas minerales, no hay otra tecnología sostenible conocida para reducir el uso y la producción de cemento.

En un comienzo, los geopolímeros fueron preparados mediante la mezcla de minerales derivados de arcillas, es decir, caolinita con soluciones alcalinas de NaOH o KOH a temperaturas entre el rango de 25 a 120 °C. Con el fin de lograr una mayor reactividad, la caolinita se convierte en metacaolinita a través de la calcinación a 650 °C durante unas horas. La metacaolinita resultante tiene un alto contenido de aluminosilicatos amorfos y partículas de tamaño más pequeñas, lo que se traduce en una mayor reactividad al contacto con la solución alcalina. En este caso, geopolímeros a base de metacaolinita han sido encontrados con propiedades mecánicas superiores (resistencia a la compresión y al fuego) en comparación con cualquier otro ligante orgánico. Los materiales geopoliméricos son formados rápidamente a bajas temperaturas, sólo unas pocas horas a 30 °C,

o unos pocos minutos a 85 °C, o unos pocos segundos en un horno de microondas (Davidovits, 1999).

Davidovits muestra la resistencia a la compresión de 60 MPa después de sólo un día de curado, la resistencia seguirá aumentando hasta 100 MPa. También muestra una dureza de 4-7 en la escala de Mohs y son térmicamente estables a la sujeción a muy altas temperaturas (1000-1200 °C), donde todas las resinas orgánicas o cemento no pueden soportar (Davidovits y Davidovics, 1998). Estos hallazgos han hecho que los geopolímeros sean potencialmente útiles para la cerámica, materiales de revestimiento refractario, así como para los materiales de construcción.

Teóricamente, cualquier fuente de aluminosilicato puede ser usada en la preparación de geopolímeros, incluidos los minerales de aluminosilicatos (Xu y Van Deventer, 2002). Varios autores han utilizado diferentes residuos como fuente alternativa de materias primas, como las cenizas volantes (Fernández, Jiménez, 2006c; Palomo et al., 1999b), y escorias de alto horno (Cheng, 2003; Krivenko, 2002).

El uso de materiales residuales ha producido de una forma barata y eficiente geopolímeros de alta calidad; Además se contribuye con el medio ambiente por lo menos en dos aspectos: 1) reducción de la producción de cemento lo que conduce a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero; los geopolímeros podría utilizar 100% de las cenizas volantes y/o escorias, mientras que el cemento sólo utiliza hasta un 30% de las cenizas volantes y/o escorias como mezclas; y 2) que proporciona una tecnología alternativa para el tratamiento de residuos y encapsulación desechos tóxicos (Khalil y Merz, 1994; Palomo y Palacios, 2003; Van Jaarsveld, 1999).

Además, los geopolímeros han demostrado ser un mejor material que el cemento y concreto debido a las siguientes propiedades:

a) *La reacción álcali-agregado (RAA)*. es bien conocida por ser un problema importante, y usualmente causa deterioro a largo plazo en la resistencia del concreto. Los materiales puzolánicos normalmente se añaden al concreto CPO con el fin de reaccionar con soluciones alcalinas o de actuar como relleno para evitar grandes movimientos de líquidos en los poros. Sin embargo, concretos de materiales residuales activados alcalinamente como el concreto de escoria tiene menor pérdida de RAA (Metso, 1982). Se conoce que ambientes altamente alcalinos causan los procesos de carbonatación aunque los efectos a largo plazo aun no se han completado de entender.

b) *Geopolímeros de resistencia al fuego*. Los geopolímeros no conservan agua en su estructura para una mayor hidratación como lo hace el CPO. La rigurosa circulación de agua en el CPO endurecido durante el secado o la aplicación de alta temperatura a menudo produce un importante encogimiento y agrietamiento. También se ha informado que el CPO típico falla 300-400 °C (Neville, 1995), mientras que el punto de fusión de los geopolímeros varía de 650-1200 °C.

Aplicaciones recientes han incluido fibras orgánicas e inorgánicas y relleno para hacer geopolímeros híbridos, compuestos que dan propiedades de resistencia y de calor superior (Barbosa y Mackenzie, 2003).

c) *Contención de residuos tóxicos*. La utilización de materiales porosos, tales como CPO y adsorbentes comerciales para contener residuos metálicos tóxicos es común en los minerales y la industria minera. A menudo, el uso está limitado por el rendimiento y el costo de los materiales, por ejemplo CPO tarda mucho tiempo en endurecer completamente lo que hace que la contención en un corto período sea difícil. Por otra parte, adsorbentes comerciales, tales como zeolitas son más caras que las CPO. El uso de geopolímeros a base de

cenizas volantes y escorias se muestra ideal para este tipo de aplicación (Davidovits, 1996; Van Jaarsveld et al, 1999).

### **2.1.2 Estructura Química Y Propiedades De Los Geopolímeros**

El elemento básico de un geopolímero es una cadena tetraédrica de silicio y aluminio mediante un intercambio de átomos de oxígeno. Sólo  $Al^4$ , y no  $Al^5$   $Al^6$  se consideran aptos para sustituir  $Si^4$  en la estructura tetraédrica. La unidad básica monomérica es un sialato, con Mn (-  $(SiO_2)$  z- $AlO_2$ ) n.w $H_2O$  esta es la fórmula empírica para polisialatos, donde z es 1, 2, 3; M es un catión monovalente, como el potasio o sodio, y n es el grado de poli condensación (Davidovits, 1991).

La estructura sialato lleva una carga negativa debido a la sustitución de  $Si^{4+}$  con  $Al^{3+}$ . El exceso de carga se ve compensada por un catión de metales alcalinos ( $Na^+$  o  $K^+$ ). Basándose en el número de átomos de silicio sustituidos por el aluminio, se cree que hay tres diferentes tipos estructuras de monoméricas -Si-O-Al- que define los geopolímeros. Davidovits (1999) clasificó los tipos de polímeros-Si-O-Al-en polisialato (PS), polisialatosiloxo (PSS), y polisialatodisiloxo (PSDS). Las estructuras de sus respectivos polisialatos y aplicación están enumeradas en la tabla 1. PSS y PS pueden ser fácilmente sintetizados a temperatura ambiente, sus rangos de aplicaciones se extienden a la inmovilización de residuos tóxicos y productos de construcción. Sin embargo, PSDS posee propiedades físicas y térmicas superiores en comparación con los formadores, por lo que se puede utilizar como revestimiento refractario o como herramienta en la preparación de materiales compuestos. (Davidovits, 1991).

Según (Barbosa, 2003) los geopolímeros preparados a partir de metacaolinita con estructura de PSS de Na y K sometidos a diversos análisis térmico, observó que había una pérdida inicial de agua alrededor de 200 °C, que se asocia con la evaporación de agua. Esta pérdida conduce a un pequeño grado de contracción;

Sin embargo, la estructura de PSS-Na es dimensionalmente estable en 250-800 °C. Un encogimiento irreversible sólo se produce a temperaturas superiores a los 800 °C, es decir, cuando el gel cristaliza. El PSS-Na comienza a fundirse a temperaturas que van desde 1200-1300 °C, mientras que el PSS-K muestra pocos signos de fusión a 1400 °C. En este caso, parece que la estructura PSS-K tiene más estabilidad térmica que la estructura PSS-Na, también las propiedades térmicas de ambos geopolímeros se ven afectadas por la cantidad de agua en la estructura. A 1000 °C, la estructura amorfa de PSS-K es reemplazada por el feldespatos cristalino, leucita y kalsilita. Un estudio de RMN sugiere a ambos sistemas un balanceo de cargas de cationes alcalinos en el PSS-K y PSDS-K, de manera similar se comporta los PSS-Na y PSDS-Na, respectivamente, es decir, en términos de la deshidratación y mecanismos de transformación cristalina.

Por otra parte, (Rahier et al. 1996). Encontró que la transición vítrea de geopolímeros de metacaolinita se produce a 650 °C, en lugar de a 800 °C. La diferencia es principalmente causada por la diferente composición de Si: Al y el contenido de agua de los geopolímeros. De hecho, estos dos factores y también la concentración de álcalis (Al / K ó Na), son parámetros que determinan la estructura y las propiedades fisicoquímicas de los geopolímeros.

**Tabla 1: Clasificación de las estructuras de polisialatos con sus respectivas aplicaciones**

<b>Clasificación</b>	<b>Estructura monomérica</b>	<b>Aplicación</b>
<b>Polisialato (PS)</b> Si: Al = 1:1	Mn-(Si-O-Al-O-)n	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aislamiento térmico</li> <li>• Resistencia al fuego</li> </ul>
<b>Polisialatosiloxo (PSS)</b> Si: Al = 2:1	Mn-(Si-O-Al-O-Si-O-)n	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Refractarios para fundición de Al</li> <li>• Cementos de alto rendimiento</li> <li>• Residuos tóxicos</li> <li>• Compuestos resistentes al fuego</li> </ul>
<b>Polisialatodisiloxo (PSDS)</b> Si: Al = 3:1	Mn-(Si-O-Al-O-Si-O-Si-O)n	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compuestos resistentes al fuego</li> <li>• Material de herramientas para su uso en el rango de temperatura de 600-1000 °C</li> </ul>

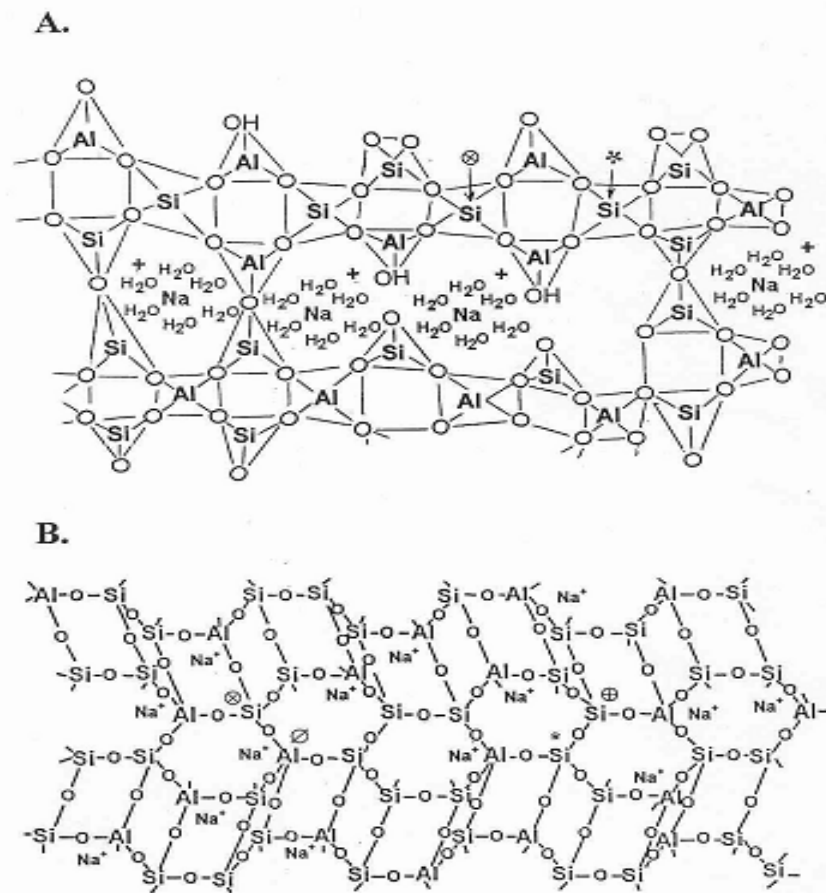
Fuente: Davidovits (1991).

Barbosa et al. (2000). encontró que, independientemente de la composición, el curado y, el método de secado, La óptima formación del polímero de PSS-Na se produce cuando la proporción de  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  es de 4.0 y la proporción de  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  es de 10. Basado en un estudio en estado sólido de RMN y MAS, también propuso un nuevo modelo de la estructura molecular del gel de geopolímero, por lo que la armazón de las estructuras están saturadas en Al, por ejemplo,  $\text{SiQ}_4$  (3AL), como se muestra en la figura 1a ( $\text{SiQ}_4$  (3AL) significa que hay 3 átomos vecinos de Al por un tetraedro de (Si). El nuevo modelo contiene tetraedros de Si y Al que son enlaces cruzados al azar para proporcionar cavidades, con el fin de acomodar el equilibrio en la carga de los iones de sodio hidratado. Este modelo es preferido porque su estructura está en un estado más desordenado y posee la capacidad para dar cabida a los iones de sodio hidratado, a diferencia de modelos anteriores sugeridos por Davidovits (1991), como se muestra en la figura 1b.

### **2.1.3 Química De La Geopolimerización**

En términos de síntesis, química y propiedades, los geopolímeros difieren ligeramente de los Cementos Alcalinos Activados (CAA). La síntesis de geopolímeros utiliza fuentes sólidas que son ricas en aluminosilicatos amorfos y soluciones activantes, Sin embargo, CAA como el nombre sugiere, por lo general se mezcla CPO con puzolanas con el fin de mejorar las propiedades físicas al inducir una mayor reacción puzolánica en la pasta del cemento. Publicaciones recientes (Roy, 1999). También han incorporado el 100% material residual, tales como cenizas volantes y escorias para sintetizar CAA. En la activación de soluciones de CAA incluyen, NaOH, KOH,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y otras soluciones de sal alcalina (Fernández-Jiménez y Palomo, 2005). Debido a la mezcla con el CPO, la aparición de aluminosilicatos amorfos y otras fases semicristalinas, como la ettringita y monosulfoaluminato es evidente en CAA, pero raras en geopolímeros.

Figura 1: (a) una estructura semiesquemática para el Na-PSS por Barbosa et al. (2000) y (b) Un modelo de Na-PSS de Davidovits (1991). Los átomos marcados de Si indican el Q4 (2AL) y Q4 (3AL), respectivamente, donde “4” hace referencia a la estructura tetraédrica Si-O, y numero antes del Al hace referencia al número de átomos de Al vecinos al tetraedro de Si-O.



Fuente: Barbosa et al. (2000) y (b) Un modelo de Na-PSS de Davidovits (1991)

Se cree que los geopolímeros son una fase amorfa metaestable de zeolies (precursores zeolíticos) que se puede convertir más bien en una fase cristalina definida (zeolitas), siempre que las condiciones y las concentraciones de reactivos que se utilizan sean adecuadas (Xu y Van Deventer, 2002). Un examen reciente por Provis et al. (2005c) sugiere que el geopolímero es constituido por agregados de nanocristales zeolíticos compactados por una fase de gel amorfo. El grado de

cristalinidad se ve afectada por las condiciones de reacción y concentración a partir de reactivos, especialmente concentraciones de silicato alcalino.

Con base en un modelo de reacción propuesto por varios autores Davidovits (1999) (Xu y Van Deventer, 2000b, 2002a), las reacciones en la geopolimerización se pueden dividir en tres etapas mecánicas, es decir, disolución / hidrólisis, reestructuración y policondensación / gelatinización.

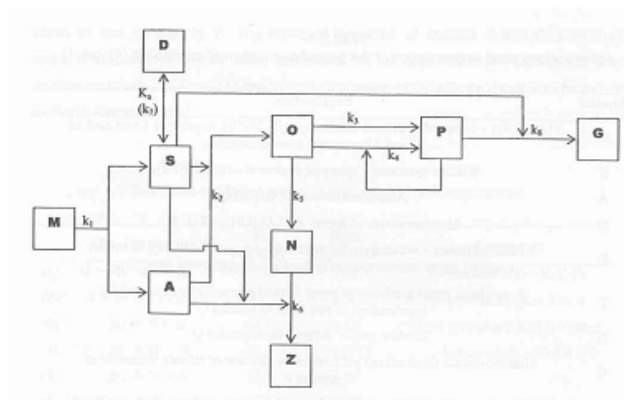
Estos tres mecanismos pueden ocurrir simultáneamente y, son reversibles en cierta medida (Phair y Van Deventer, 2001). La cinética de cada una de estas etapas varía según el tipo de aluminosilicato, relación sólido solución, concentración de silicato alcalino, contenido de agua y la condición de reacción. Cada etapa será discutida en mayor detalle.

- a) *Disolución/hidrólisis.* El geopolimerización comienza con la hidrólisis de  $H^+$  con cationes monovalentes ( $Na^+$ ,  $K^+$ ); esto es seguido por la disolución continua de los aluminosilicatos precursores, producto de la disolución de la ruptura de las bandas de Si-O-Si ó Si-O-Al en las partículas de aluminosilicato (sol) para formar reactivos precursores  $Si(OH)_4$  y  $Al(OH)_4^-$  en la solución. Pasada la disolución es probable que se produzca simultáneamente con la gelatinización de Aluminosilicato, que ocurre generalmente en la superficie sólida debido que la densidad de gel es mayor.
- b) *Reestructuración.* En la solución, los aluminosilicatos precursores son móviles y son capaces de orientarse parcialmente un mejor estado termodinámicamente estable.
- c) *Gelatinización.* La condición supersaturada es alcanzada cuando la concentración de disolución de las especies son mayores que las concentraciones de los saturados. En el punto de sobresaturación, la polimerización de  $Al^{3+}$  y  $Si^{4+}$  se produce de inmediato. El paso polimerización también se caracteriza por la expulsión de agua molecular del gel

geopolimérico, por lo tanto, la contracción de los materiales suele observarse también.

Recientemente, Provis et al. (2005) propuso una reacción hipotética para la síntesis de geopolímeros a base de metacaolinita, como se ilustra en la Figura 2. Explicación de los símbolos en la Tabla 2. El modelo de reacción se basa en la meteorización de minerales aluminosilicatados en medios alcalinos (Faimon, 1996). La relación de silicio a aluminio se asume que se mantendrán constantes a lo largo del progreso de la reacción, es decir, 2:1. La cinética modelada fue comparada con la cinética experimental obtenida de la activación de metacaolinita en Calorimetría Diferencial de Barrido en una temperatura isotérmica, 35 °C. Hasta ahora, este modelo cinético ha sido fundamental y más descriptivo que los modelos anteriores. Sin embargo, todavía carece de los datos experimentales para apoyar la validez de cada paso en los diferentes sistemas sólido-líquido, contenido de agua, y temperaturas de reacción.

**Figura 2: La posible reacción en vías de la geopolimerización La descripción de cada símbolo se presenta en la tabla 2 y los "Kn" representan las constantes cinéticas de las reacciones individuales.**



Fuente: Provis et al., 2005

**Tabla 2: La descripción de los símbolos.**

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
M	Metacaolín, $1/2 (Al_2O_3, SiO_2)$
S	Monómero de silicato, $Si(OH)_4$
A	Monómero de aluminato, $Al(OH)_4^-$
O	Oligómero de aluminosilicatos, $AlSi_2O_2(OH)_8^-$
D	Oligómero de silicato, representados por dímeros, $Si_2O(OH)_6$
P	Polímero amorfo de aluminosilicatos, formado por combinaciones de dos unidades de especies O
N	Núcleo de zeolitas formado por especies O
G	Gel de aluminosilicatos (sílica-alta) formado por adición de monómeros de especies p
Z	Fases zeolíticas (Sílica-baja), formado por adición de A, S y N

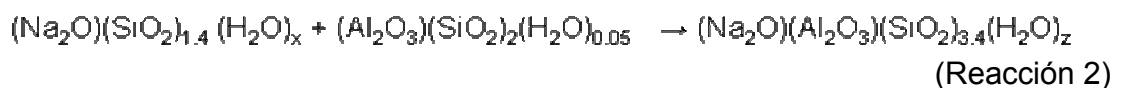
Fuente: (Provis et al., 2005).

#### **2.1.4 Efecto Del Silicato Soluble**

La cinética y el mecanismo de geopolimerización son en gran medida afectados por al menos tres factores, es decir, la concentración de silicato, concentración y tipo de cationes metálicos alcalinos y condiciones de curado (por ejemplo, temperatura, tiempo y humedad). Las propiedades físicas de los geopolímeros basados en metacaolinita han mejorado significativamente cuando se añade más silicato (Palomo y Glasser, 1992; Palomo et al., 1999). El mismo efecto también se observa para los geopolímeros a base de cenizas volantes (Palomo et al., 1999b). Xu y Van Deventer (2002b) observó que una geopolimerización óptima de la mezcla de estilbita / caolinita depende en gran medida de la concentración de silicato usada y, sólo se produce cuando las soluciones de silicato son

homogéneamente dispersas en la presencia de álcalis (MOH, donde M = Na, K) antes de la adición de minerales sólidos.

El efecto de adición de silicato soluble en la síntesis de geopolímeros fue en primer lugar investigada más a fondo por Rahier et al. (1996). En lugar de geopolímero, GIBT (Gel Inorgánico de Baja Temperatura) el término es utilizado para describir el material, aunque la síntesis y química tienen semejanzas similares a los de los materiales geopoliméricos. A partir del estudio, GIBT se encontró que tienen un alto límite de elasticidad y resistencia a la compresión, que son comparables a la de un vidrio convencional o material cerámico, pero no requieren secado y sinterización adicional durante la síntesis. GIBT es sintetizado mediante la activación de la caolinita calcinada (metacaolinita) en Na-silicato con soluciones SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O con relación mola de 1 a 2,15. Rahier et al. (1996) propone que una relación óptima se obtiene cuando en la metacaolinita el Al es totalmente consumido en la estructura de silicato. Esto significa que una relación óptima de Al / Na debe ser igual a uno, para cada Al presente en la estructura del aluminosilicato, un catión es necesario para equilibrar el exceso de carga, como se ilustra en la siguiente ecuación.



Donde X se refiere a la cantidad de moléculas de agua enlazadas en la solución de silicato y Z al número de moléculas de agua en GIBT. El efecto de la concentración de álcalis (H<sub>2</sub>O/M<sub>2</sub>O) sobre la reacción cinética, el calor de reacción y composición del gel no es tan importante como el efecto de la concentración de silicato (SiO<sub>2</sub>/M<sub>2</sub>O).

Fernández, Jiménez y Palomo (2002) utilizaron concentraciones más altas de silicato (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O = 1,0-6,0) y encontraron una relación óptima 1,7 para geopolímeros a base de cenizas volantes. Sin embargo, el estudio

fundamentalmente no explica el efecto de la relación de silicato en la química de geopolimerización. Phair (2001) utilizó partículas de zirconia no reactivas para investigar la química de superficie y las reacciones de superficie de las especies de polisialato. Y comprobó que la resistencia a la compresión de geopolímeros a base de cenizas volantes donde se incorporo zirconia es mayor que los geopolímeros sin zirconia. La causa de este aumento en la resistencia ha sido la hipótesis de que se debe a la formación específica de zirconia asociados a las especies 3-dimensional de polisialato. Se ha comprobado que la adsorción de las especies de silicato en partículas de zirconia es inicialmente influenciado por la concentración de cationes hidratados, pero la posterior adsorción está controlada por la policondensación de especies de silicato. La medida de policondensación es dependiente de la polimerización de las especies de silicato y la cantidad de coprecipitación de las especies de silicato de sodio, que varían dependiendo del pH de la solución. Como el pH es incrementado, la concentración del disolvente de silicio y aluminio en la solución es incrementado también. Se concluye que la adsorción del polisialato y el silicato en zirconia son mayores cuando las especies de sílice monomérica están abundantemente presentes en la solución.

### **2.1.5 El Efecto De Los Cationes (Na, K, Ca)**

Se cree que el catión Na aumenta la disolución de la fase amorfa, debido a su asociación con el anión monomérico de silicato, mientras que el catión  $K^+$  se cree que mejora el crecimiento de la red de gel debido a su asociación con los aniones más grande de aluminosilicato (McCormick y Bell, 1989a). El comportamiento similar de los cationes de metales alcalinos se observa también en la geopolimerización. Van Jaarsveld (1999) demostró que el grado de disolución de aluminio y los precursores de silicio es mayor en geopolímeros basados en Na que los basados en K. Sin embargo, el grado de formación de gel en geopolímeros a base de K es más alto que los geopolímeros basados en Na.

### **2.1.6 El Efecto De La Temperatura De Curado Y Tiempo De Envejecimiento**

Alonso y Palomo (2001a, b) utilizaron condiciones de la calorimetría para examinar la activación alcalina de metacaolinita con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a 35, 45 y 60 °C. Ellos atribuyeron las curvas de calorimetría a la disolución, a la precipitación de fases de aluminosilicato amorfo y a la formación de fases zeolíticas. Alonso y Palomo (2001a, b) también observaron que el aumento en la temperatura de curado da lugar al aumento del índice de reacción. La misma tendencia se aplica a los geopolímeros a base de cenizas volantes, el cual a altas temperaturas de curado, tanto la disolución como la policondensación son aceleradas (Bakharev, 2005; Palomo et al., 1999). La formación de fases zeolíticas, tales como hidroxisodalita y chabazita, son también observadas en las cenizas volantes activadas con soluciones alcalinas a altas temperaturas (Bakharev, 2005). Van Jaarsveld et al. (2002) encontró que geopolímeros sintetizados de una mezcla de caolinita y cenizas volantes reportaron que a prolongadas altas temperaturas de curado (70-80 °C) se produce un decrecimiento del esfuerzo mecánico debido a la evaporación de agua de poros y a la desintegración de gel geopolimérico.

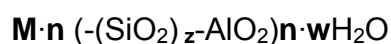
Basándose en la literatura presentada, se observa que pocos estudios se han realizado sobre el efecto de las condiciones de curado. Sin embargo, gran parte del trabajo previo se ha dirigido hacia el efecto de curado en cementos activados alcalinamente o mezclas de cementos puzolánico (Alonso y Palomo, 2001a, b), en lugar de geopolímeros. Además, la investigación del efecto de las condiciones de curado se limita a las propiedades físicas del geopolímero, como su resistencia, durabilidad y contracción de los materiales (Bakharev, 2005; Bakharev et al., 1999). Esto, sin embargo, no proporciona una comprensión fundamental y sistemática del efecto de curado y el mecanismo de la cinética de geopolimerización.

### 2.1.7 Reacción De Geopolimerización

La reacción de geopolimerización se produce bajo condiciones altamente alcalinas entre un polvo de aluminosilicato y una solución activadora (basada en una mezcla molar de hidróxido sódico y un silicato alcalino, por ejemplo, de sodio o de potasio) a condiciones ambientales. A nivel de laboratorio se suele usar metacaolín como material de partida para la síntesis de geopolímeros, siendo este generado por la activación térmica de caolinita. Se han llevado a cabo numerosos estudios usando desechos industriales de metacaolín y otros aluminosilicatos.

El proceso de polimerización es llevado a cabo al poner al material puzolánico en contacto con la solución activadora alcalina, lo cual da como resultado la formación de cadenas poliméricas tras haberse reorientado los iones en solución. Estas cadenas poliméricas pueden ser consideradas hipotéticamente como el resultado de la policondensación de iones de ortosialato. Dado que el mecanismo exacto de reacción aún no ha sido determinado completamente, se asume usualmente que la síntesis es llevada a cabo por medio de oligómeros, los cuales proveen las estructuras unitarias de la red macromolecular tridimensional.

Los geopolímeros que están basados en aluminosilicatos son llamados polisialatos. Este término es una abreviación de poli-(sílico-oxo-aluminato) o  $(-\text{Si-O-Al-O-})_n$ , siendo  $n$  el grado de polimerización. La red sialato consiste en tetraedros de  $\text{SiO}_4$  y  $\text{AlO}_4$  unidos por átomos compartidos de oxígeno. Dentro de las cavidades de la red, deben estar presentes iones positivos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Ba}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ) para contrarrestar las cargas negativas del  $\text{Al}^{3+}$  para que el aluminio pueda estar unido a tres oxígenos, como el silicio. La fórmula empírica de los polisialatos es la siguiente:



Donde  $M$  es cualquiera de los cationes mencionados arriba,  $n$  es el grado de polimerización,  $z$ , que puede ser 1, 2 o 3, determina el tipo de geopolímero

resultante, lo cual significa, que si z es igual a 1 la red será del tipo polisialato (PS), si z vale 2, la red será polisialato siloxo (PSS) y si Z vale 3, la red será polisialato disiloxo (PSDS), y w es el número de moléculas de agua asociadas (Davidovits, 1991).

Las estructuras de sus respectivos polisialatos están enumeradas en la figura 3 PSS y PS pueden ser fácilmente sintetizados utilizando la química sol-gel a temperatura ambiente y, sus rangos de aplicaciones se extienden a la inmovilización de residuos tóxicos y productos de construcción. Sin embargo, PSDS posee propiedades físicas y térmicas superiores en comparación con los formadores, por lo que se puede utilizar como revestimiento refractario o herramientas de material compuesto (Davidovits, 1991).

**Figura 3: Tipos de polisialatos**

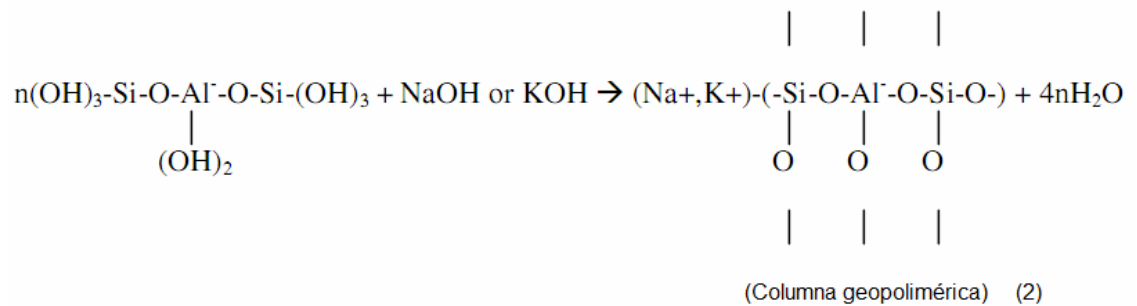
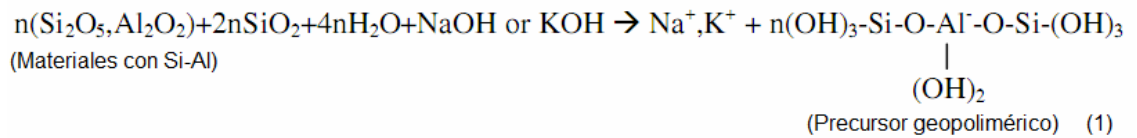
PS Poly(sialate)	(-) (-Si-O-Al-O-)     O O 
PSS Poly(sialate-siloxo)	(-) (-Si-O-Al-O-Si-O-)       O O O 
PSDS Poly(sialate-disiloxo)	(-) (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)         O O O O 

Fuente: Davidovits, 1988

El proceso de polimerización involucra una reacción química bajo condiciones altamente alcalinas de los materiales de partida ricos en Al y Si produciendo enlaces poliméricos del tipo Si-O-Al-O, lo cual puede representarse esquemáticamente de la siguiente manera:

El esquema de formación del material geopolimérico es descrito por las ecuaciones (1) y (2) (Davidovits, 1994; van Jaarsveld et al., 1997):

**Figura 4: Esquema de la reacción de geopolimerización.**



Fuente: (Davidovits, 1994; van Jaarsveld et al., 1997):

Estas reacciones químicas indican que cualquier material rico en Si ó Al podrían llegar a ser fuentes de geopolimerización (Van Jaarsveld et al., 1997). El proceso químico de geopolimerización involucra dos etapas: (1) disolución de los materiales de partida en soluciones alcalinas para formar una gel rica en Si y Al sobre la superficie de los materiales, (2) policondensación para formar cadenas poliméricas.

### 2.1.8 Ventajas Y Desventajas De Los Geopolímeros

Las propiedades primordiales de interés para los usuarios de materiales de construcción son la resistencia mecánica y la durabilidad. Algunas ventajas que pueden explotarse del empleo de materiales cementosos constituidos parcial o totalmente por desechos o subproductos son los siguientes (con respecto de los materiales basados en cemento Pórtland):

- Propiedades mecánicas similares o en muchos casos superiores.
- Durabilidad mejorada a ambientes químicos agresivos (p. ej., agua de mar, pisos en plantas químicas).
- Extensión de la capacidad de producción del cemento cuando se usan como reemplazo (10-90%) sin requerir de procesamiento térmico adicional (ahorro de energía y menor contaminación).
- Reducción de la acumulación de desechos en tiraderos o rellenos.

Comparado con las ventajas obtenidas, las des-ventajas son de poco peso, pero deben tenerse en consideración en algunos aspectos tecnológicos. En el uso de escorias de alto horno inicialmente la resistencia mecánica es menor a los productos elaborados con cemento Pórtland y las ventajas se obtienen en el largo plazo (después de 28 días): mejor durabilidad, resistencia al ataque químico, propiedades mecánicas superiores. Las escorias activadas presentan fluidez y tiempos de fraguado menores que el cemento Pórtland, lo que puede representar problemas para concretos premezclados y su colado. El manejo de los agentes activantes alcalinos puede ser un factor de riesgo si se hace sin control.

### **2.1.9 Parte Ambiental**

**2.1.9.1 Cemento y Contaminación.** Durante los últimos 60 años el estudio de la fabricación y utilización del cemento Pórtland se ha atendido con enfoques cada vez menos empíricos y más científicos. A raíz de esto, los procesos de producción se han mejorado; uno de los más notables ha sido el cambio del proceso que manejaba la materia prima en húmedo (barbotinas) al manejo en seco; como resultado se obtuvieron ahorros de energía de más del 40%, sin mencionar la reducción de emisión de contaminantes y del tamaño de los hornos. La producción de cemento es un proceso de alta demanda energética de combustibles ( $\approx 4,000$  kJ/kg cemento, 25% de pérdidas) y con alta emisión de contaminantes (0.85-1 kg CO<sub>2</sub> /kg cemento) por descarbonatación de materia prima y uso de combustibles. Las restricciones ambientales impuestas a las

cementeras son cada vez más estrictas <sup>M</sup>, lo que deberá llevar a la optimización de procesos o a la búsqueda de alternativas para la resolución de los diversos problemas y necesidades actuales.

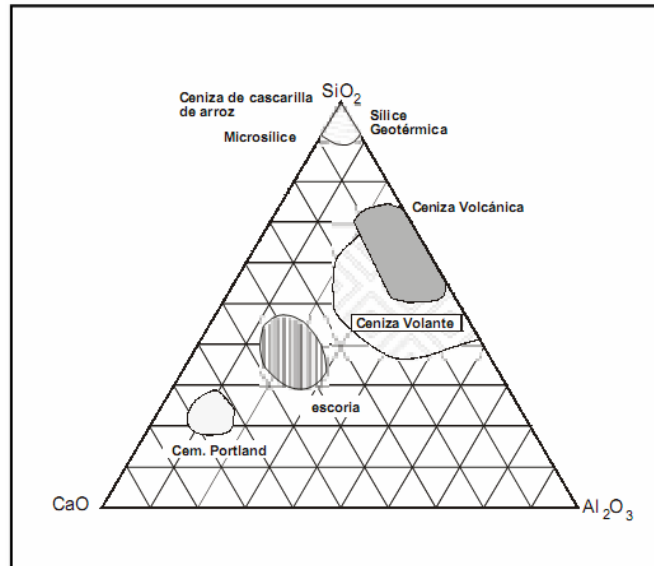
Desde la perspectiva internacional, existe el constante crecimiento de la población, que a su vez demanda infraestructura de vivienda y social en los lugares de asentamiento. Para satisfacer la creciente demanda de cemento es necesario buscar esquemas alternativos de apoyo, de otra suerte los costos económicos, energéticos y ecológicos serían muy altos. La producción mundial de cemento es de aproximadamente 1500 millones de toneladas, con la consecuente emisión de casi la misma cantidad de toneladas de CO<sub>2</sub>

Por esto, existe la necesidad de crear materiales de construcción menos contaminantes y de menor costo; por otro lado, dada la diversidad y lo extremo del clima en algunas regiones, se requieren materiales con propiedades diversas, por ejemplo térmicamente aislantes.

**2.1.9.2 Materiales Alternativos:** Los materiales alternativos tienen cabida como materias primas o materiales cementosos de reemplazo parcial o total del cemento Pórtland. Parte de la generación de CO<sub>2</sub> viene de descarbonatación del CaCO<sub>3</sub> que representa alrededor del 80% de la materia prima (0.3 Kg CO<sub>2</sub> /Kg cemento). El uso de fuentes de CaO diferentes puede aliviar parcialmente tal situación. Por otro lado, es posible usar cenizas y escorias como materias primas.

Se puede definir un material adhesivo alternativo como aquel que tenga propiedades cementosas (que requieren ser potenciadas externamente), esto es, que pueda emplearse como sustituto parcial o total del cemento Portland. A continuación se revisarán algunos detalles respecto a su composición química, origen, forma de uso y posibles ventajas.

**Figura 5. Composición química aproximada de los materiales alternativos empleados en construcción**



Fuente: Escalante, 2002)

**2.1.9.3 Materiales Puzolánicos:** Las puzolanas son aquellos materiales de composición rica en  $\text{SiO}_2$ , similares a las cenizas volcánicas utilizadas por los romanos. Ejemplos de éstos son la ceniza volcánica, la sílice condensada, algunos caolines, ceniza de cascarilla de arroz y desechos geotermiales. La tabla 3 presenta un resumen de algunas de sus características. Todos estos materiales pueden ser empleados como reemplazo parcial del cemento Pórtland y algunos como reemplazo total. Los materiales puzolánicos son así llamados por la interacción química con los productos de hidratación del cemento, principalmente  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ ; la reacción que describe tal proceso es llamada “reacción puzolánica”

**Tabla 3. Características generales de los materiales puzolánicos**

	<b>Procesamiento adicional requerido</b>	<b>Características</b>	<b>Origen</b>
<b>Sílice condensada</b>	Aglomeración para su manejo	Partículas esféricas de tamaño < 1µm. Alta área superficial	Vapores condensados de la producción de carburo de silíceo
<b>Ceniza volcánica</b>	Molienda	Reactividad variable, partículas de forma irregular	Emisiones volcánicas
<b>Ceniza de cascarilla de arroz</b>	Calcinación, se aprovecha el calor generado como combustible	Morfología irregular, tamaño muy fino alta área superficial	Producción de grano de arroz
<b>Sílice geotérmica</b>	Lavado	Morfología irregular, tamaño submicrónico, alta área superficial	
<b>Caolines</b>	Tratamiento térmico hasta 800°C	Tamaño de partícula fina, alta área superficial	Mineral
<b>Ceniza volante</b>		Partículas esféricas de tamaño variable similar o menor a las del cemento Portland	Generadas por la combustión de carbón en la generación de electricidad

Fuente: Escalante, 2002)

**2.1.9.4 Materiales Artificiales.** Estos materiales son de los más comúnmente empleados en la escoria de alto horno granulada; sin embargo, es posible emplear escorias de otros procesos como los de aceración, producción de fósforo, cobre, zinc y plomo (Tufekci, 1997).

Pueden considerarse como materiales sintéticos dado que son subproductos. En términos generales requieren de molienda antes de ser empleados como reemplazo del cemento Pórtland.

Para el caso de escoria de alto horno (producción de hierro), los niveles de sustitución por cemento (Daube, 1986). son de 10 a 90% y varían según las normas locales. Al igual que las puzolanas, interacciona con los productos de hidratación del cemento pero la reacción es diferente ya que los materiales hidráulicos, como la escoria de alto horno, contienen calcio en su composición química.

Existen otras fuentes de residuos. Por ejemplo, el yeso puede provenir de la industria cerámica tradicional (producción de muebles para baños, etc.) o como subproducto de fabricación de ácido fluorhídrico. Otros materiales de residuos que pueden ser empleados son las escorias de otras industrias metalúrgicas, así como lodos de drenaje, lodos de producción de aluminio o residuos de incineradores municipales. Por supuesto, es necesaria una base de datos o una bolsa de desechos industriales que permita la reutilización y el aprovechamiento de desechos de este tipo.

**2.1.9.5 Esquema y ventajas de estos materiales:** Los esquemas de materiales adhesivos existentes varían en función de su composición y sus propiedades; una posible clasificación considera sistemas básicos o substituidos. Los materiales cementantes son nobles y son muchos los materiales que pueden incorporarse. Un ejemplo de esto es la inmovilización de residuos peligrosos en matrices de cemento Pórtland o hasta la incorporación de llantas recicladas que mejoran la impermeabilidad del sistema. El cemento Pórtland (cemento base) puede reemplazarse por los materiales indicados en la tabla 4. En todos los casos se obtienen mejores propiedades de resistencia y de durabilidad. Los materiales

como la sílice condensada y la escoria inducen propiedades de alta resistencia mecánica (120Mpa).

**Tabla 4. Cementos substituidos a base de cementos portland**

<b>Ligante básico</b>	<b>Materiales de reemplazo</b>	<b>Resistencia mecánica</b>
<b>Cemento Portland</b>	Ceniza volante	√
	Ceniza volcánica	√
	Escoria de alto horno	√
	Sílice condensada	√√√
	Caolines	√
	Sílice geotérmica	√√

Fuente: Segre, 2000

Otro esquema es el de los desechos químicamente activados, por ejemplo las escorias de alto horno activadas. En este caso no se usa cemento Portland y las reacciones de hidratación de la escoria se activan con agentes alcalinos como hidróxido de sodio, silicato de sodio y carbonato de sodio. Las propiedades mecánicas resultantes dependen del tipo de agente activante: generalmente las mejores propiedades se obtienen con silicato de sodio y las más pobres con hidróxido de sodio.

Algunos estudios sobre la adición de residuos de sílice geotérmica al sistema de escoria con NaOH indican incrementos significativos de las propiedades mecánicas. Los productos de reacción generados son similares al C-S-H del cemento Portland. La posibilidad de combinar algunos desechos con la escoria activada con agentes de bajo costo ha dado resultados promisorios. Las cenizas volantes activadas están también bajo estudio con buenas propiedades

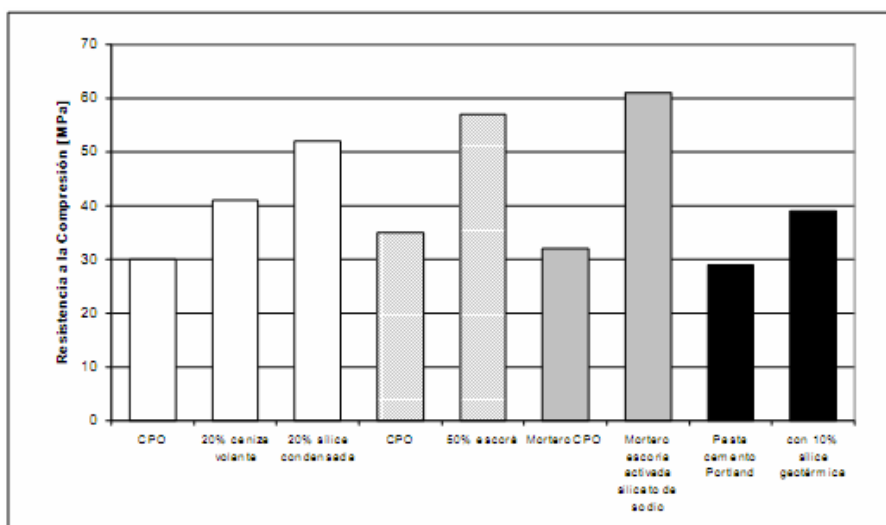
mecánicas. La tabla 5 presenta algunos esquemas con pequeñas fracciones o nada de cemento Pórtland.

**Tabla 5. Cementos generados con residuos químicamente activados**

<b>Ligante básico</b>	<b>Características</b>	<b>Observaciones</b>
Escoria de alto horno activada por álcalis	Excelentes propiedades mecánicas 0% cemento Pórtland	Posiblemente puede Incorporar otros desechos, ahorro de hasta 40 % en costos
Ceniza volante activada por álcalis	Propiedades mecánica aceptable, 0% cemento Pórtland	
Escoria de producción fósforo y cobre	Buenas propiedades mecánicas, 0% cemento Pórtland	
Cemento de sulfoaluminatos de calcio	Relativamente reciente, en desarrollo con excelentes propiedades	Menor demanda energética que el cemento Pórtland
Cementos supersulfatados	5% cementos Pórtland, 80-85% escoria, 10-15% yeso	No soportan curado a alta temperatura

Fuente: Escalante, 2002

Figura 6. Resistencia a la compresión de diversos sistemas cementosos.



Fuente: Escalante, 2002

## 2.2. CEMENTO

### 2.2.1 Definición

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

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

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

### **2.2.2 Producción Del Cemento Portland**

El cemento portland está definido por la norma ASTM C 150 como un aglomerante 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 también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de da calcio y es producido por una mezcla de materiales sintetizados a aproximadamente 1450 °C. los principales óxidos presentes en la materia prima son CaO, SiO<sub>2</sub>, AlO<sub>3</sub> y FeO<sub>3</sub>. Los materiales usados para la producción de cemento portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro. Durante la fabricación, se hace análisis químico frecuente a todos los materiales para garantizarse una calidad alta y uniforme del cemento.

### **2.2.3 Tipos de cemento**

Se fabrican diferentes tipos de cemento portland para satisfacer los requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas.

El cemento Pórtland tiene varias clasificaciones dependiendo de su composición química y sus propiedades físico-químicas obteniéndose así, diferentes tipos de cemento.

Existen varias clasificaciones pero éstas dependen del país de origen y de la respectiva normatización que le corresponda.

En la normatividad correspondiente a Colombia está la Norma Técnica Colombiana Icontec, las cuales están basadas en las normas de la ASTM de los Estados Unidos y en la norma NTC 30 es la que rige actualmente y desde hace varios años en Colombia, la cual debe tener una aplicabilidad en este tipo de consultas a lo largo y ancho de nuestro territorio nacional que dispone dicha entidad. Los diseños propuestos en esta tesis están basados en dicha norma con el fin de darle mayor efectividad a la investigación a desarrollar, y por ende se ajusta a todos los requerimientos necesarios y exigidos.

“La clasificación de la cual se está indicando la encontramos en la NTC del Icontec y la cual se va a mencionar a continuación, que es la correspondiente a nuestro país:

El cemento Pórtland tipo 1 es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales.

El cemento Pórtland tipo 2 se rebaja la cantidad de silicato tricálcico y aluminato tricálcico que al reducirlos mejoran sus cualidades notablemente.

En el cemento Pórtland tipo 3 se aumentan apreciablemente la cantidad de silicato tricálcico ya que es el compuesto que contribuye en mayor proporción a dicho fenómeno ya mencionado y al posterior endurecimiento de la pasta; El cemento Pórtland tipo 4 se reducen aún más los porcentajes de silicato tricálcico y aluminato tricálcico principales responsables del calor de hidratación del cemento. Naturalmente la reducción del silicato tricálcico hace que este cemento adquiera en forma lenta su resistencia mecánica.

El cemento Pórtland tipo 5 se hace una fuerte reducción del contenido de aluminato tricálcico, para evitar la formación de sulfoaluminio de calcio, cuando el

concreto es atacado por sulfatos, sustancias que al formarse en el concreto endurecido producen su destrucción.

Existen otros tipos de cementos Portland como el cemento Portland puzolánico o con algún otro material adicional los cuales no han sido insertados dentro de las normas ya mencionadas.

#### **2.2.4 Composición Química Del Cemento**

“Caliza + Arcilla + Temperatura = Clinker

Caliza  $\Rightarrow$   $\text{CaCO}_3$

Arcilla  $\Rightarrow$  Sílice, alúmina, hierro y otros

$\text{CaCO}_3 + T^\circ \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 + \text{Arcilla}$

#### **2.2.5 Hidratación Del Cemento Portland**

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

- Alita, silicato tricálcico alimentado con iones positivos.
- Belita, silicato dicálcico alimentado por iones positivos.
- Aluminato tricálcico.
- Ferro aluminato de calcio.
- Álcali sulfatos.
- Sulfato de calcio en la forma de bihidrato, hemihidrato o anhidrita con clinker.

- Agua de mezclado.

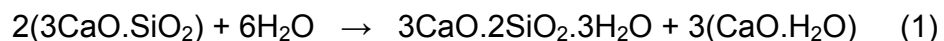
El proceso de hidratación consiste en reacciones simultáneas que ocurren de los compuestos anhidros con agua. Se sabe que los aluminatos se hidratan más rápidamente que los silicatos. En realidad, las características de la rigidización (pérdida de consistencia) y del fraguado (solidificación) de una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

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

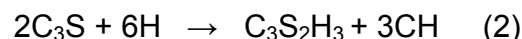
El Silicato de Calcio Hidratado (C-S-H) es la principal fase de hidratación y la responsable de la resistencia mecánica de las pastas de cemento, es similar al producido en las reacciones individuales de C<sub>3</sub>S y C<sub>2</sub>S y exhibe poca cristalinidad, en su estructura pueden quedar embebidos iones como Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> o SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>

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

Silicato tricálcico + agua → C-S-H + hidróxido de calcio



Que en forma abreviada se representa de la siguiente manera:



Silicato dicálcico + agua → C-S-H + hidróxido de calcio



Que en forma abreviada se representa de la siguiente manera:



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

## **2.3 LAS PUZOLANAS**

### **2.3.1 Origen De Las Puzolanas**

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 Pozzuoli de donde derivan su nombre.

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 Monte Vesubio.

### **2.3.2 Definición de Puzolana**

La norma ASTM 618 define lo siguiente: “Las puzolanas son materiales silíceos o aluminio-silíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes”.

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.

### **2.3.3 Clasificación De Las Puzolanas Según Su 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.

**2.3.3.1 Las puzolanas naturales:** Son productos minerales con características composicionales (silico-aluminosos), estructurales (estructura imperfecta o amorfa) y texturales (grano fino) que los hacen aptos para su uso como aditivos activos en la industria del cemento, entre estas 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 hayan afectado.

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 6:

**Tabla 6. Composición química típica de las puzolanas volcánicas**

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
<b>Variación</b>	42 - 73	10 -20	1 -14	0 - 12	0 - 11	1 -5	1 -5	0 - 0.5
<b>Promedio</b>	57.4	15.8	5.5	4.7	2.1	3.2	3.1	-

Fuente: Autor del Proyecto

- Rocas o minerales sedimentarios ricos en sílice hidratada y formadas en yacimientos submarinos, por acumulación de esqueletos y caparzones de radiolarios y diatomeas.
- Existen algunas rocas y minerales no puzolánicos de origen pero que al descomponerse generan productos de naturaleza puzolánica, los cuales son muy escasos en el mundo.

**2.3.3.2 Puzolanas artificiales:** Las puzolanas artificiales, son subproductos de procesos industriales y requieren por consiguiente equipo para su disposición, en algunos casos se requiere un tratamiento para obtener la mayor reactividad de éstas, entre las puzolanas artificiales podemos citar las *cenizas volantes*, las

cuales se producen en la combustión de carbón mineral en las plantas térmicas de generación de electricidad. *Arcillas activadas* o calcinadas artificialmente: por ejemplo residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800<sup>0</sup>c. El *humo de sílice*, proveniente de la industria de aleaciones de ferro-silicio. *Escorias de fundición*: principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos, estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa. Las *cenizas de residuos agrícolas*: como la *ceniza de cascara de arroz* y las *cenizas del bagazo de caña de azúcar*, cuando son quemados convenientemente se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina cuyo estructura depende de la temperatura de combustión (Neville 1999).

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 los cementos aumentan la trabajabilidad 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.

**2.3.3.3 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 puzolánicamente activos depende principalmente de:

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

Dentro de éstos están el ópalo, el trípoli y las diatomitas. Químicamente tienen la composición que se muestra en la tabla 7.

**Tabla 7. Composición química típica de las puzolanas sedimentarias orgánicas**

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
<b>Variación</b>	42 - 58	13 -19	4 -14	1 - 12	1 - 11	1 -7	1 -7	-
<b>Promedio</b>	57.4	15.8	5.5	4.7	2.1	3.2	3.1	-

Fuente: Autor del Proyecto

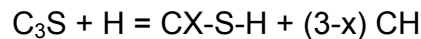
### **2.3.4 Aplicación De Las Puzolanas En El Cemento Portland Ordinario**

Hoy día, existen múltiples usos que pueden darse a la puzolana, si bien de entre todos ellos destaca la fabricación de Cemento Pórtland Puzolánico (CPP); la puzolana puede reemplazar una buena porción del cemento portland del 20 al 40%, disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más

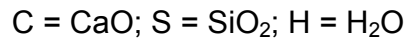
barata que el clinker y más económica de moler. Las ventajas que ofrece el cemento Pozolánico sobre el resto se detallan a continuación:

- 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.
- Reemplazan una buena porción del cemento portland del 20 al 40%, disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más barata que el clinker y más económica de moler.
- Mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros.
- Mayor resistencia frente al agua de mar.
- Aumento de la impermeabilidad ante la reducción de grietas en el fraguado.
- Reducen el calor generado durante la hidratación, la cual es una reacción bastante exotérmica.
- Incremento en la resistencia a la compresión.
- Incrementa la resistencia del acero a la corrosión.
- Aumenta la resistencia a la Abrasión.
- Aumento en la durabilidad del cemento.
- Disminuye la necesidad de agua.

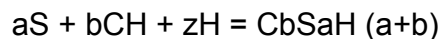
La base de todas estas mejoras es el denominado “Efecto Pozolánico” en el cemento. Los Aluminosilicatos presentes en la puzolana, reaccionan con el Hidróxido de Calcio liberado en la hidratación del cemento Pórtland. Esto se realiza en una reacción lenta (que disminuye el calor), consume el Hidróxido de Calcio (lo que mejora su resistencia frente a ambientes ácidos), y al realizarse la reacción rellenan los espacios resultantes de la reacción de hidratación del cemento (lo que aumenta la impermeabilidad y la resistencia mecánica). La reacción química del fraguado del cemento es como sigue:



Donde:



Siendo el Gel C-S-H el responsable de las propiedades mecánicas del cemento. Podemos observar que se produce un tercer producto, abreviado CH en la fórmula, que no es sino el  $Ca(OH)_2$ , con poco valor cementante, y que es responsable de la reacción con los sulfatos que degradan la calidad del mismo. Para hacer frente a este problema, es por lo que se añade la puzolana. Ésta, se compone de aluminosilicatos que reaccionan con el componente CH de la forma siguiente:



Donde:

S = Aluminosilicatos de la puzolana (Composición tipo  $SiO_2$  (75%) +  $Al_2O_3$  (10%) y otros).



Tal como se ha dicho hasta ahora, existen otros materiales que tienen actividad puzolánica en mayor o menor medida. Entre ellas se encuentran las escorias de fundiciones de acero, la microsíllica o humo de sílice que se genera como producto secundario en la fundición de aleaciones de ferrosilicatos, metacaolines procedentes del tratamiento térmico del caolín, y las cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón en plantas térmicas. No obstante, estos sustitutos de la puzolana no presentan la misma superficie de reacción que las de origen natural, debido a que la puzolana de origen volcánico presenta una mayor cantidad de poros originados por los gases de la erupción, no presentando hoy por hoy unas propiedades igual de óptimas.

## 2.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

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

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

La resistencia a la compresión se puede definir como:

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

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

Los principales factores que gobiernan la resistencia del concreto son los siguientes: relación agua7materiales cementantes (mc), condiciones de curado (humedad y temperatura), edad, cantidad y características del material

cementante, cantidad y características de los agregados, tiempo de mezclado, grado de compactación y contenido de aire.

La resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi) o en (MPa) en unidades SI los requerimientos para la resistencia a la compresión pueden variar desde 2500psi (17MPa) para concreto residencial hasta 4000psi (28Mpa) y mas estructuras comerciales. Para determinadas aplicaciones se especifican resistencias superiores hasta de 10000 psi (70MPa) y más.

### **3. PARTE EXPERIMENTAL**

#### **3.1 MATERIALES Y EQUIPOS**

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

- Puzolana natural
- Silicato de sodio neutro 42
- Hidróxido de sodio 98% pellets
- Arena sílica estándar (según la norma NTC 220)
- Cemento Portland tipo 1 (marca Holcim).
- Aceite mineral
- Agua

Los equipos utilizados en la preparación de morteros fueron los siguientes:

- Moldes
- Envases
- Balanza digital
- Mezcladora
- Compactador de madera
- Máquina de ensayos de compresión
- Espátula
- Tamices
- Probetas graduadas
- Mufla

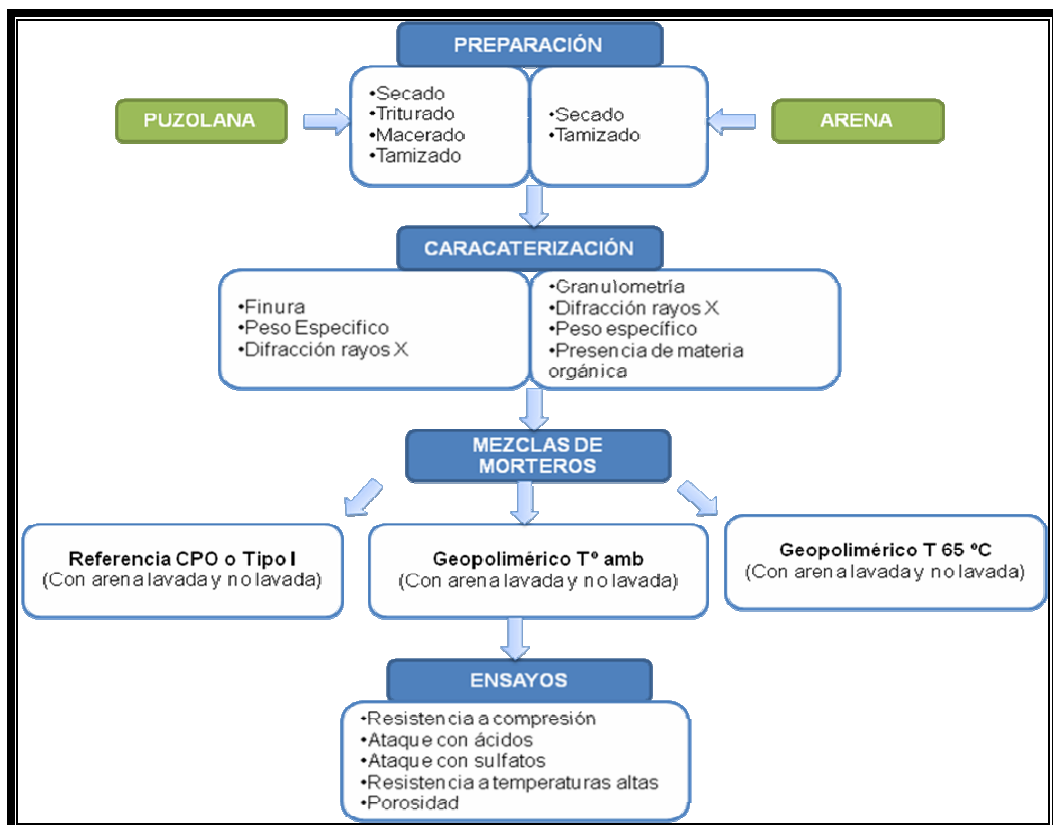
- Horno

### 3.2 METODOLOGÍA

#### 3.2.1 Desarrollo Experimental

A continuación se presenta en forma esquemática el desarrollo experimental realizado en la investigación (figura 7) este esquema involucra el procedimiento de preparación, las técnicas de caracterización y las pruebas físicas aplicadas a cada uno de los tipos morteros preparados.

**Figura 7: Representación esquemática del desarrollo experimental.**



Fuente: Autor del Proyecto

### 3.2.2 Preparación De Los Materiales

La preparación de los materiales se llevó a cabo en el laboratorio de arcillas ubicado en la Universidad Industrial de Santander.

**3.2.2.1 Puzolana** La puzolana para la síntesis de geopolímeros fue extraída de una cantera de explotación de CEMEX localizada en Paipa (Boyacá).

El tratamiento de la puzolana se realizó de la siguiente manera: primero el material se secó al sol durante tres días con el fin de eliminar el agua sin alterar sus propiedades físicas, seguidamente se utilizó un triturador de placas, marca RETSCH (figura 8a) para reducir el tamaño de las piezas grandes, posteriormente se utilizó un mortero de ágata electrónico marca RETSCH 100 RM (figura 8b) utilizando porciones de 50 g maceradas durante diez minutos con el fin de pulverizar y obtener un polvo finamente dividido con un tamaño de grano inferior a 125  $\mu\text{m}$  (figura 8c).

**Figura 8: Equipo utilizado para la preparación de la puzolana.**



**a:** Triturador

**b:** Mortero de ágata

**c:** Tamiz 125  $\mu\text{m}$

Fuente: Autor del Proyecto

**3.2.2.2 Arena:** La arena utilizada en la preparación de las diferentes mezclas fue extraída del Río Chicamocha, la cual es reconocida por su alta calidad para la preparación de concretos de alta resistencia.

El tratamiento de la arena se realizó de la siguiente manera: primero el material se tamizó con el fin de obtener la granulometría exigida por la norma 220, (*Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado*), posteriormente una parte del materia se lavó en el tamiz de 200 (75 µm) con el fin de eliminar las impurezas (material orgánico o arcilloso que esta presentara).

**3.2.2.3 Hidróxido De Sodio (Soda Caustica):** Se utilizó hidróxido de sodio en pellets al 98% de pureza, adquirido a nivel comercial. (CONQUIMICA)

**Tabla 8. Propiedades físicas del NaOH**

<b>Análisis</b>	<b>Especificación</b>
Apariencia	color blanco
Olor	Inodoro
pH	14
Peso molecular	NaOH
Densidad	2,13 g/cm <sup>3</sup>
Peso molecular	40

Fuente: Autor del Proyecto

**3.2.2.4 Silicato De Sodio Neutro 42:** El silicato de sodio que se utilizó como activante, se adquirió a nivel comercial, cuyas especificaciones técnicas están a continuación. (CONQUIMICA)

**Tabla 9. Ficha técnica**

<b>PROPIEDAD</b>	<b>ESPECIFICACION</b>	<b>VALOR TÍPICO</b>
RELACIÓN (SiO <sub>2</sub> : Na <sub>2</sub> O)	3.00 – 3.25	3.10
DENSIDAD BAUMÉ (° Be)	40.5 – 43.5	42
ÓXIDO DE SODIO (% p/p Na <sub>2</sub> O)	8.76 – 9.86	9.27
ÓXIDO DE SILICIO (% p/p SiO <sub>2</sub> )	27-39 – 30.27	28.74
GRAVEDAD ESPECÍFICA	1.3876 – 1.4286	1.4078
SÓLIDOS TOTALES (% p/p)	36.79 – 39.73	38.01
pH		11.3

Fuente: Autor del Proyecto

### **3.2.3 Caracterización De Los Materiales De Partida**

Los materiales fueron caracterizados con el fin de conocer sus propiedades físicas y garantizar que se cumplieran las especificaciones establecidas por la norma técnica colombiana para la preparación de morteros de 50 mm de lado, su caracterización fue realizada por medio de los siguientes ensayos:

La caracterización física de los materiales de partida se llevó a cabo en el laboratorio Andina Ingeniería.

- Granulometría
- Análisis mineralógico DRX
- Peso específico
- Finura
- Presencia de material orgánico (Azul de metileno)

**3.2.3.1 Análisis granulométrico:** El análisis granulométrico tuvo por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de arena; el cual consistió en separar las partículas en sus diferentes tamaños utilizando

tamices en orden decreciente; inicialmente se tomó la fracción granular, se pesó en la balanza y luego se llevó a cabo el tamizado para separar las diferentes partículas 1.18 mm, 0.6 mm, 0.425 mm, 0.25 mm y 0.15 mm, comenzando en orden decreciente, teniendo en cuenta de no mezclar las partículas tamizadas; finalmente se determinó el peso de cada fracción retenida, verificando que la suma de los pesos retenidos en cada tamiz diera igual al peso de la fracción granular inicial, con una tolerancia de 0.5%.

**3.2.3.2 Análisis Mineralógico Por Difracción De Rayos X:** Se realizó un análisis mineralógico por difracción de rayos X para determinar las diferentes fases minerales cristalinas y amorfas de los materiales.

Este método se basa en la interacción entre los rayos X y la materia cristalina que produce la difracción. Así pues, cuando la radiación incide sobre una estructura cristalina se produce la difracción del haz cuando se cumple ( $n \lambda = 2d \sin \theta$ ), y manteniendo la  $\lambda$  de la radiación incidente y  $n$  constantes se pueden determinar variaciones en el espacio entre planos reticulares, o bien en el ángulo de difracción. Las muestras se toman del material proveniente preparado y se colocan en el portamuestras. La muestra es irradiada con rayos X de una determinada longitud de onda y la muestra y detector giraran simultáneamente cambiando el ángulo, así, a medida que los diferentes planos se ajustan a la ley de Bragg se produce la difracción. Los análisis fueron realizados en un equipo marca *RIGAKU* modelo *D/MAX III B* ubicado en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander.

**3.2.3.3 Determinación Del Peso Específico:** El peso específico (densidad relativa) de un agregado es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión).

Se determino de la siguiente manera: se pesó el picnómetro vacío, limpio y seco junto con su tapón, se puso la muestra de arena dentro del picnómetro y se volvió a pesar, se relleno el picnómetro con agua destilada, se puso el tapón, se secó y se pesó; luego se transfirió en su totalidad la muestra a un recipiente, para secar y pesar nuevamente y proceder con los cálculos.

Para el caso de la determinación del peso específico en el cemento y la puzolana fue el siguiente: se utilizó el frasco Le Chatelier, inicialmente se lleno con agua hasta un punto entre la marca 0 y 1 ml registrando la lectura a una temperatura de 23° C, se añadió 64 g de muestra y se colocó en posición inclinada para eliminar el aire atrapado, se tomó y se registró la lectura final en el frasco a la misma temperatura inicial.

**3.2.3.4 Determinación De La Finura** La finura del cemento influye en el calor de hidratación liberado y en la velocidad de hidratación. A mayor finura del cemento, mayor rapidez de hidratación del cemento y por lo tanto mayor desarrollo de resistencia.

Se procedió a pesar 50 gramos de muestra seca, se colocó en el tamiz limpio y seco, con el fondo puesto sin la tapa. Se tamizó hasta que la mayoría del material fino pasó y el residuo tuviera una apariencia limpia. Luego se pesó el residuo y se procedió con los cálculos. El ensayo fue hecho por medio de la *Norma Técnica Colombiana para el sector de la construcción (ICONTEC 226)*.

**3.2.3.5 Presencia De Materia Orgánica (Azul De Metileno):** Este análisis tiene por objeto determinar la presencia de materia orgánica o arcillas dañinas en la arena; la solución de azul de metileno es titulada en pequeños incrementos en un recipiente que contiene agua destilada y la muestra de material menor del tamiz de 75 µm (malla 200).

Después de cada incremento se retira del recipiente una pequeña cantidad del agua con la muestra, empleando una varilla agitadora de vidrio y se deja caer en forma de gota sobre el papel filtro. Cuando la muestra de agregado no pueda absorber más azul de metileno se forma un anillo azul en el papel filtro. En este momento se procede a cuantificar la cantidad de solución de azul de metileno añadida y a calcular el valor de azul de metileno (mg/g miligramos de azul por gramo de muestra).

### **3.2.4 Diseño De La Mezcla**

A continuación se describe las proporciones utilizadas para las mezclas realizadas en el trabajo de investigación.

El trabajo se inició con la preparación de los materiales por medios mecánicos, posteriormente se realizó su caracterización física que contempló el estudio de la densidad, finura, granulometría; se obtuvieron también las fases cristalinas y amorfas de los componentes minerales por medio del DRX, finalmente se realizaron los ensayos (pruebas fisicomecánicas) a los morteros.

Las pruebas físicas se realizaron para cada una de los siguientes morteros:

- **CPO-ANL**, Mortero de cemento portland ordinario o tipo I con arena no lavada.
- **CPO -AL**, Mortero de cemento portland ordinario o tipo I con arena lavada.
- **G-ANL**, Mortero de puzolana con arena no lavada curado a temperatura ambiente.
- **G-AL**, Mortero de puzolana con arena lavada curado a temperatura ambiente.
- **G-ANL-65**, Mortero de puzolana con arena no lavada curado a 65 °C
- **G-AL-65**, Mortero de puzolana con arena lavada curado a 65 °C

La caracterización de los materiales y los ensayos se realizaron de acuerdo a las normas NTC para el sector de la construcción y las normas INVE.

**3.2.4.1 Mortero De Cemento Portland (De Referencia):** Para la preparación del mortero de referencia se utilizó la Norma Técnica Colombiana NTC 220, donde las proporciones que se utilizaron fueron fue de una parte de cemento y 2,75 partes de arena; y una relación de agua cemento de 0.485.

En la siguiente tabla se muestra las proporciones generales para obtener seis o nueve cubos de ensayo:

**Tabla 10: Cantidad de materiales de cemento portland**

<b>Material</b>	<b>6 cubos</b>	<b>9 cubos</b>
Cemento, g	500	740
Arena, g	1375	2035
Agua, ml	242	359

Fuente: Autor del Proyecto

Se realizaron un total de 66 probetas de cemento portland ordinario, 33 con arena lavada y 33 con arena no lavada, de las cuales 9 fueron para el ensayo de resistencia a la compresión evaluadas a los 7, 14 y 28 días de curado; 9 se sumergieron en una solución de ácido sulfúrico para ser evaluados durante cuatro semanas; otras 9 probetas se sumergieron en una solución de sulfato de magnesio durante cuatro semanas y los 6 restantes se les evaluó el comportamiento frente a las altas temperaturas.

**Tabla 11: Ensayos y número de probetas realizados de CPO**

<b>Arena</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Nº de probetas</b>
Arena no lavada	Resistencia a la compresión	9
	Ataque de ácidos	9
	Ataque de sulfatos	9
	Altas temperaturas	6
Arena Lavada	Resistencia a la compresión	9
	Ataque de ácidos	9
	Ataque de sulfatos	9
	Altas temperaturas	6
		<b>66 probetas</b>

**3.2.4.2 Mortero Geopolimérico:** Para la preparación del mortero geopolimérico al igual que las probetas de cemento portland se utilizó la norma NTC 220, pero con la sustitución de cemento portland por puzolana y el agua por la solución activante (NaOH + NaSiO<sub>3</sub>); las proporciones que se utilizaron fueron de una parte de puzolana y 2,75 partes de arena y una relación de la solución activante puzolana de 0.485.

En la preparación de morteros se realizaron un total de 132 probetas, 66 curadas a temperatura ambiente y 66 curadas a 65°C durante 24 horas (Tabla 12)

Al igual que a las probetas de CPO se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, inmersión en ácidos, inmersión en sulfatos y comportamiento a altas temperaturas a las probetas geopoliméricas, cuyas propiedades fueron comparadas con aquellas de las probetas de CPO.

**Preparación de la solución activante:** La solución activante se preparó disolviendo hidróxido de sodio al 98% en pellets en agua destilada hasta que se obtuvo una concentración 8M, la cual fue mezclada con el silicato de sodio neutro 42 con relación molar  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O} \approx 3.0$  ( $\text{SiO}_2 = 28.74\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 9.27\%$ , y  $\text{H}_2\text{O} = 61.99\%$  por masa); la relación hidróxido de sodio /silicato de sodio fue de 1:2,5.

**Tabla12: Ensayos y número de probetas realizados de cemento geopolimérico.**

<b>Arena</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Nº de probetas curadas a Tº amb</b>	<b>Nº de probetas curadas a 65ºC</b>
Arena no lavada	Resistencia a la compresión	9	9
	Ataque de ácidos	9	9
	Ataque de sulfatos	9	9
	Altas temperaturas	6	6
Arena Lavada	Resistencia a la compresión	9	9
	Ataque de ácidos	9	9
	Ataque de sulfatos	9	9
	Altas temperaturas	6	6
		<b>132 Probetas</b>	

Fuente: Autor del Proyecto

### 3.2.5 Elaboración De Probetas

Para la preparación de las probetas se siguió el siguiente proceso:

- a) Limpiar los moldes
- b) Secar los moldes
- c) Engrasar los moldes
- d) Calcular las proporciones de la pasta de cemento

- e) Pesar las proporciones de la pasta de cemento
- f) Homogenizar la mezcla
- g) Agregar agua o solución activante a la mezcla
- h) Verter pasta de cemento al 50% de capacidad del molde
- i) Compactar la pasta vertida en los moldes
- j) Verter pasta de cemento al 100% de la capacidad del molde
- k) Retirar el exceso de pasta de cemento en los moldes
- l) Compactar la pasta vertida en los moldes
- m) Cubrir los moldes con plástico
- n) Retirar las mezclas de los moldes (24 horas después)
- o) Referenciar las mezclas con los códigos respectivos

**Figura 9: Procedimiento de preparación de las probetas.**



**a) Engrasado**



**b) Compactación**



**c) Retirado de exceso de pasta**



**d) Desmoldado**



e) Referenciado de mezclas.

Fuente: Autor del Proyecto

### 3.2.6 Ensayos Realizados A Las Probetas

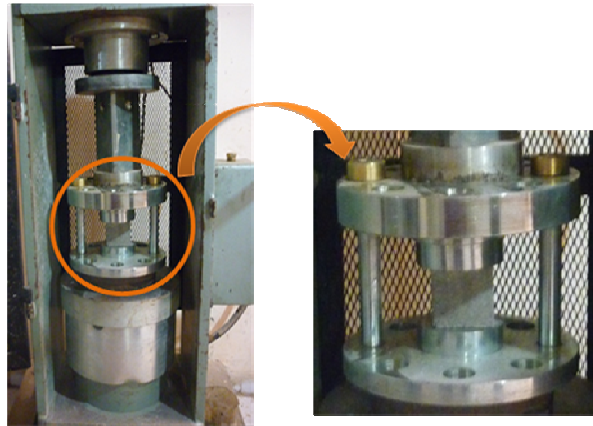
Los ensayos a las probetas se realizaron con el fin de caracterizar las propiedades fisicomecánicas de las diferentes mezclas; y se compararon con las del mortero de referencia para ver su posible aplicación en la industria cementera.

**3.2.6.1 Resistencia A La Compresión:** La determinación de la resistencia a la compresión se realizó de la siguiente manera:

Los cubos se dejaron 24 horas en los moldes, transcurrido este tiempo se dejaron curar durante 7, 14 y 28 días en un cuarto húmedo (cámara húmeda) en donde permanecieron hasta el momento del ensayo; se procedió a realizar tres ensayos a probetas de la misma mezcla para cada día de curado y sacar un promedio para cada edad.

Las pruebas de resistencia a la compresión de las mezclas se llevaron a cabo sobre especímenes, siguiendo los procedimientos especificados en la NORMA ICONTEC 220. *Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm de lado.*

**Figura 10. Ensayo de resistencia.**



Fuente: Autor del Proyecto

**3.2.6.2 Ataque Con Ácidos:** El ensayo de ataque con ácidos se realizó con el fin de someter el mortero a condiciones extremas de exposición, simulando una situación de ambientes agresivos.

La prueba de resistencia al ataque con ácidos se realizó sobre el material cementante (mortero geopolimérico y morteros de OPC); debido a que no existe un procedimiento estándar universalmente aceptado, el tipo y concentración de la solución acida a la cual los especímenes son expuestos puede ser variada.

Para el caso de la investigación los especímenes fueron curados durante 21 días, luego fueron expuestos a una solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) con una concentración de  $pH = 1$ , cuyo volumen de solución fue cuatro veces mayor que el volumen de estos, a lo largo de cuatro semanas se ensayaron dos cada semana de la misma mezcla para sacar un promedio y, se dejó un testigo de cada mezcla que fue evaluado a las nueve semanas de estar expuesto a la solución.

El ataque con ácido fue evaluado mediante la pérdida de peso y el ensayo de resistencia a la compresión.

**3.2.6.3 Ataque Con Sulfatos:** El ataque por sulfatos se debe fundamentalmente a la interacción fisicoquímica entre los minerales de la pasta de cemento hidratada y los iones sulfato del medio. Su consecuencia es la expansión, agrietamiento, pérdida de masa y desintegración del concreto. La resistencia del concreto a los sulfatos depende de numerosos factores, tales como la permeabilidad del concreto, el tipo ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$  y  $\text{CaSO}_4$ ) y concentración de sulfato presente y las características del cemento, entre los cuales el contenido de aluminato tricálcico es fundamental.

El ensayo de ataque con sulfatos, al igual que el ataque con ácidos se realizó con el fin de someter el mortero a condiciones extremas de exposición, simulando una situación de ambientes de salinidad.

La prueba de resistencia al ataque con sulfatos se realizó de la misma forma que el ataque con ácidos; la concentración de sulfato de magnesio fue de 50 g/L. El ataque de sulfatos fue evaluado mediante el ensayo de resistencia de compresión y pérdida de peso.

#### **3.2.6.4 Comportamiento A Altas Temperaturas**

Para ver el comportamiento frente a las altas temperaturas se trabajó con dos probetas de cada mezcla con 28 días de curado; las probetas fueron expuestas por un periodo de dos horas a las temperatura de 300, 600 y 1000 °C.

En cada mezcla se determinó los cambios de peso y resistencia mecánica.

**Figura 11. Exposición de los especímenes a altas temperaturas.**



Fuente: Autor del Proyecto

### 3.2.6.5 Porosidad

**Figura12. Método para determinar la porosidad y densidad**



Tomado de la tesis Diseño de concretos de alta resistencia a partir de una puzolana natural.

La porosidad fue determinada mediante las técnicas de saturación y flotación; las probetas fueron pesadas y sumergidas en agua 24 horas, luego se extrajeron y se secaron con una toalla para tomar el peso saturada superficialmente seca, por último se continuó con la toma de peso sumergidas mediante el uso de una canasta como se observa en la figura 11.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A LOS MATERIALES

A continuación se presentan los resultados de los ensayos obtenidos

#### 4.1.1 Puzolana

Figura 13. Foto puzolana



Fuente: Autor del Proyecto

**4.1.1.1 Análisis Mineralógico (DRX):** Las fases mineralógicas de los distintos componentes minerales para mezcla de mortero

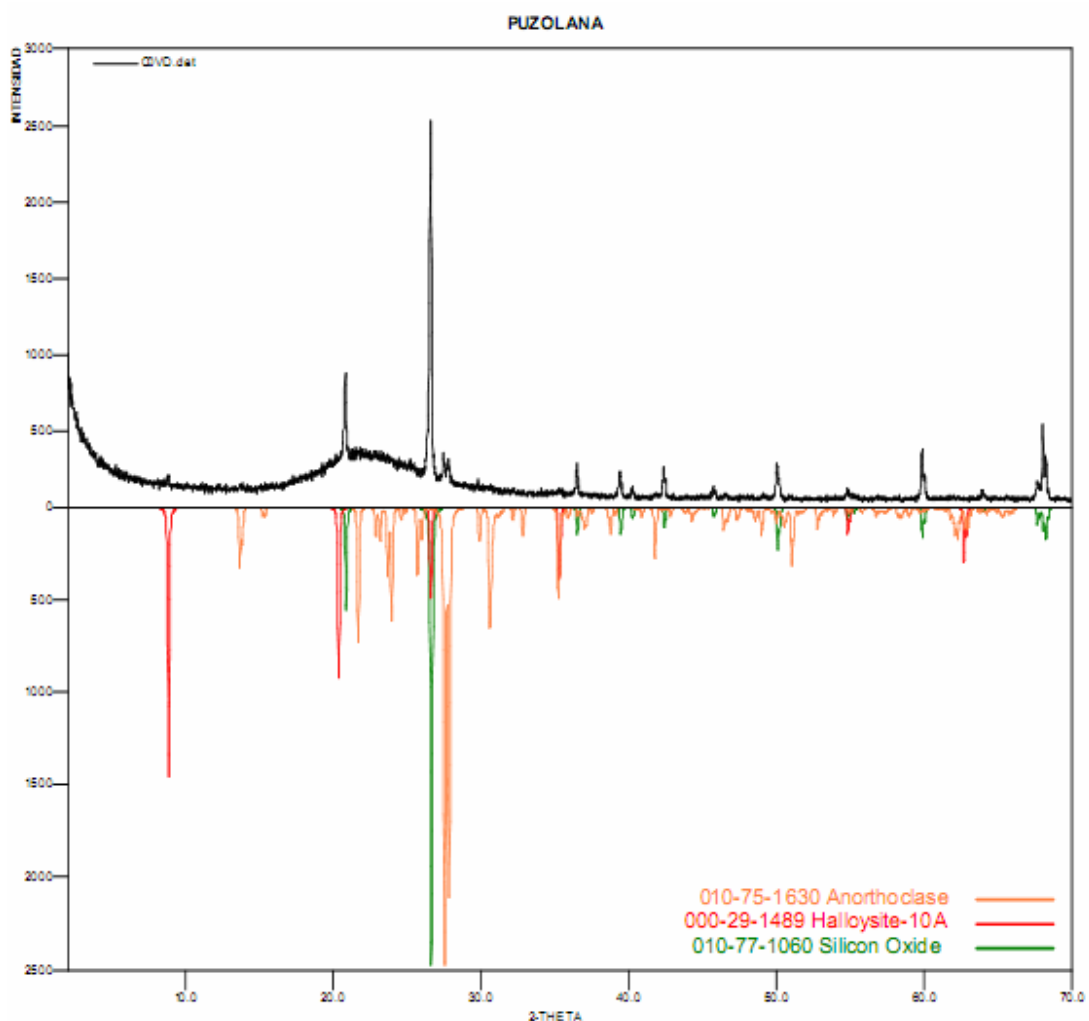
#### Composición química o mineralógica

Tabla 13. Fase mineralógica de la puzolana

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	000-29-1489	Halloisita
	$\text{SiO}_2$	010-77-1060	Cuarzo
	$(\text{Na}_{0.887}\text{K}_{0.333})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	010-75-1630	Anortoclasa

Fuente: Laboratorio DRX

Figura 14. Análisis mineralógico de la puzolana



Fuente: Laboratorio DRX

**4.1.1.2 Peso Específico:** Para determinar el Peso específico de la puzolana se utilizó la norma 221 para el cemento hidráulico.

**Método de ensayo para determinar el peso específico del cemento hidráulico Norma técnica Colombiana para el sector de la construcción (ICONTEC 221).**

Se llenó el frasco Chatelier con Kerosene hasta un punto situado entre las marcas 0 y 1 ml, se limpió el interior del frasco y se agregó 40g de puzolana en pequeñas cantidades observando que el cemento no se adhiriera a las paredes de

él, se colocó el tapón y se giró en posición inclinada, hasta no ascendieran burbujas a la superficie del líquido para sacarle el aire.

CÁLCULOS:

PESO ESPECIFICO =  $\frac{\text{Peso de puzolana, en gr.}}{\text{Volumen desplazado, en ml}}$

$$\text{PESO ESPECÍFICO} = \frac{40\text{gr}}{(18.9 - 0.1)} = 2.12\text{gr/ ml}$$

#### 4.1.1.4 Finura

**Método de ensayo para determinar la finura del cemento Norma Técnica Colombiana para el sector de la construcción (ICONTEC 226).** Se utilizó esta norma para conocer la finura del material.

Se tomó 100gr de Puzolana, se tamizó con tapa, se retiró el fondo para pesa el material que pasó el tamiz 200.

**Figura 15. Método de ensayo para determinar la finura de la puzolana**



Fuente: Autor del Proyecto

#### CÁLCULOS:

F = Finura de la puzolana pasa el tamiz 200

Rc = Residuo corregido

Rs = Residuo retenido en el tamiz 200

C = Factor de corrección del tamiz (0)

$$Rc = Rs (100 + C)$$

$$Rc = 6,58gr$$

$$F = 100 - Rc$$

$$F = 93.42 \%$$

#### 4.1.2 Arena

La arena utilizada principalmente estaba compuesta por cuarzo, feldespato potásico, moscovita, plagioclasa, anfíboles y fragmentos de rocas; el tamaño de grano de las partículas estaba entre el rango de 1.19mm (malla 16) y 0.149 mm (malla 100) con una forma de granos comprendida entre angular y subangular.

**Figura 16. Foto arena**



Fuente: Autor del Proyecto

#### 4.1.2.1 Análisis Granulométrico

##### Análisis granulométrico por tamizado para agregados finos INVE 123

El análisis granulométrico reveló que la arena estaba dentro del rango ideal para la preparación de morteros.

Peso de la muestra seca = 2000gr

**Tabla 14. Análisis granulométrico por tamizado de la arena**

TAMIZ N°	ABERTURA TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (gr)	(%) RETENIDO	(%) QUE PASA
N° 16	1,18	0	0,00	100,00
N° 30	0,6	100	5,00	95,00
N° 40	0,425	500	25,00	75,00
N° 50	0,25	1350	67,25	32,25
N° 100	0,15	50	2,50	0,00
PASA N° 100		0	0,00	0,00

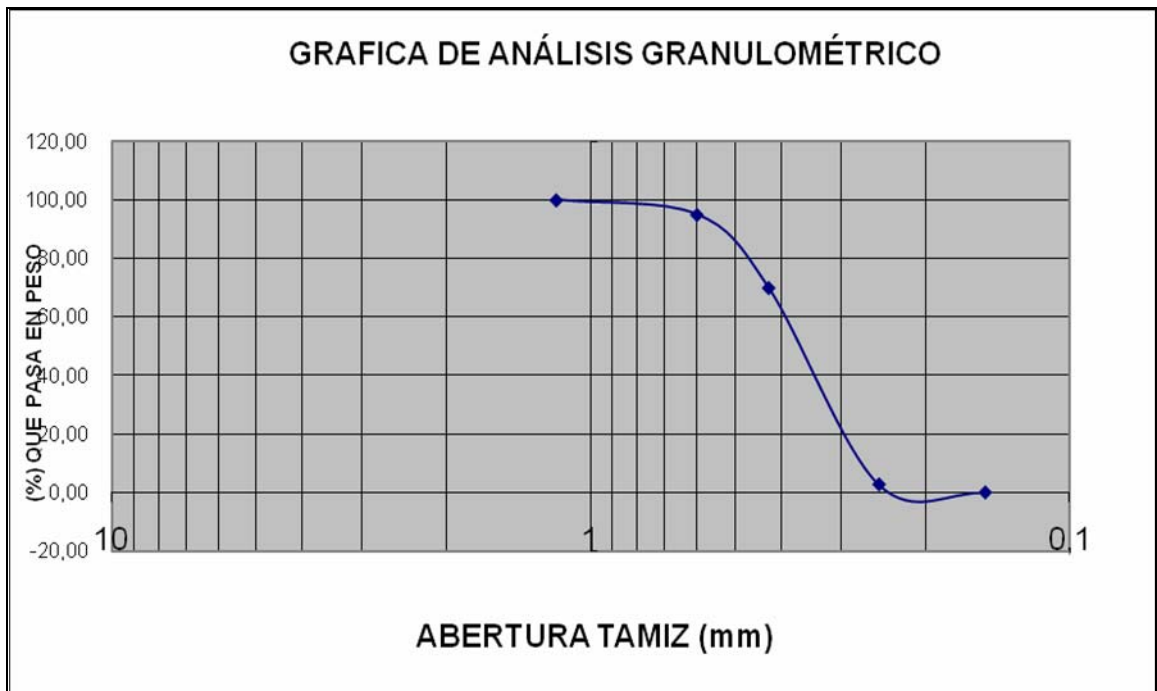
Fuente: Autor del Proyecto

**Tabla 15. Gradación permisible**

Tamices	% Que pasa
1.18 $\mu\text{m}$ (No.16)	100
600 $\mu\text{m}$ (No.30)	96 - 100
425 $\mu\text{m}$ (No.40)	65 - 75
300 $\mu\text{m}$ (No.50)	20 - 30
150 $\mu\text{m}$ (No.100)	0 - 4

Fuente: Autor del Proyecto

Figura 17. Análisis granulométrico de la arena.



Fuente: Autor del Proyecto

**4.1.2.2 Análisis mineralógico (DRX):** Las fases mineralógicas que se obtuvieron con el análisis de DRX aparecen en la siguiente figura

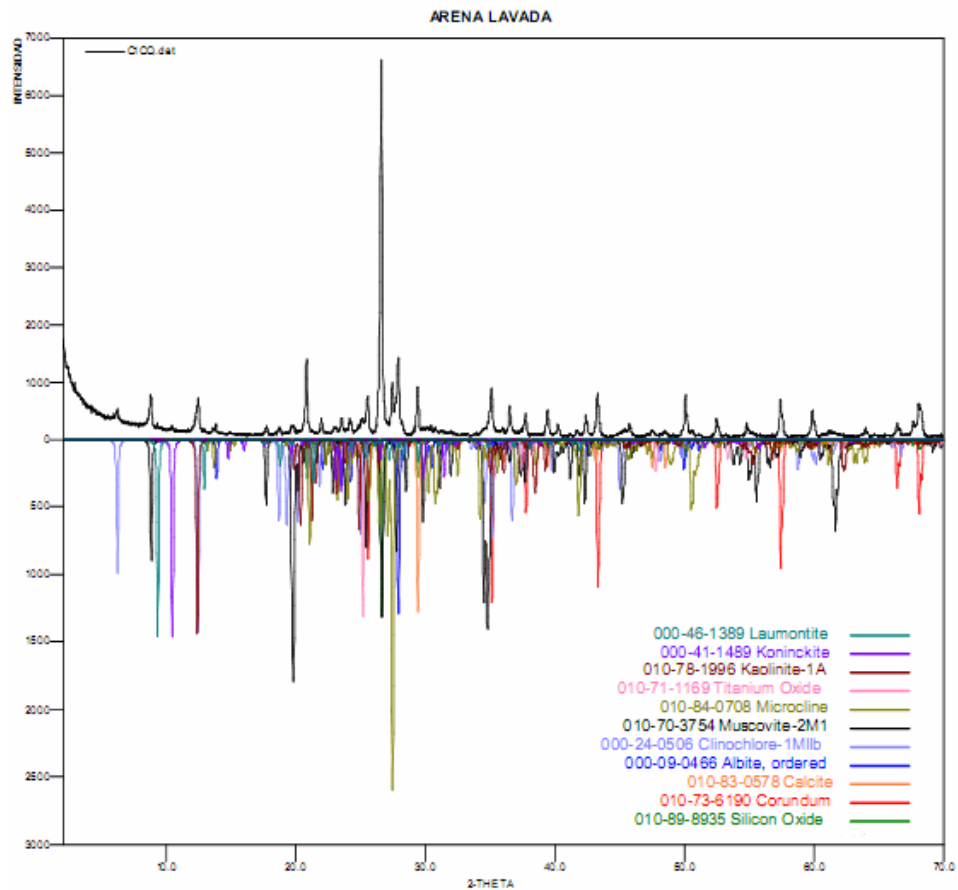
Tabla 16. Composición mineralógica de la arena

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	$Al_2 ( Si_2 O_5 ) ( OH )_6$	010-78-1996	Caolinita	5.1 % (D.E = 0.1)
	$Fe PO_4 \cdot 3 H_2O$	000-41-1489	Konickita	N.D.
	$Ca_4 Al_2 Si_2 O_{18} \cdot 14 H_2O$	000-46-1389	Laumontita	1.8 % (D.E = 0.1)
	$Ti O_2$	010-71-1169	Anatasa	N.D.
	$K Al Si_3 O_8$	010-84-0708	Microclina	10.0 % (D.E = 0.2)
	$K ( Al_4 Si_2 O_{13} ( OH )_2 )$	010-70-3754	Moscovita	16.1 % (D.E = 0.2)
	$( Mg_2 Al ) ( Si, Al )_4 O_{10} ( OH )_2$	000-24-0506	Clinocloro	8.4 % (D.E = 0.2)
	$Na Al Si_3 O_8$	000-09-0466	Albita	12.9 % (D.E = 0.2)
	$Si O_2$	010-89-8935	Cuarzo	32.3 % (D.E = 0.2)
	$Ca CO_3$	010-83-0578	Calcita	6.0 % (D.E = 0.1)
Total cristalinos				92.6 %
Amorfos y otros				7.4 %

Fuente: Laboratorio DRX

- La fase Koninckita presente en la muestra Arena Lavada, no fue cuantificada debido a que no se encuentran reportados sus datos cristalográficos en la base de datos para su respectiva cuantificación.

**Figura 18. Análisis mineralógico de la arena.**



Fuente: Laboratorio DRX

#### 4.1.2.3 Peso específico y absorción de agregados finos

**Método para determinar el peso específico y la absorción de los agregados finos norma INVE 222.**

Se tomó una muestra representativa de arena obtenida por cuarteo con un peso de 800gr, luego se colocó en una superficie no absorbente (mesón), donde se secó con una corriente de aire suave (secador).

Se colocó la muestra en tres capas en el molde cónico, se dejó caer libremente el pisón sobre la superficie desde una altura aproximadamente 1cm durante 25 veces, se alisó la muestra y levantó el molde verticalmente, en donde la muestra se derrumbó parcialmente lo cual indicó la condición de saturado superficialmente seco.

Después se tomo 500gr de la muestra saturada superficialmente seca y se colocó en una probeta llena de agua la cual se pesó y se obtuvo el peso sumergido. Esta muestra se secó en la estufa moviéndola con frecuencia para conseguir un secado uniforme en donde se obtuvo el peso seco.

CALCULOS:

**Tabla 17. Cálculos para determinar el peso específico y la absorción de agregados finos.**

		Datos tomados	Cálculos
A	Peso al aire de la muestra secada en el horno, (gr).	493	
B	Peso del picnómetro aforado lleno de agua (gr).	640	
C	Peso total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua (gr).	937	
S	Peso al aire de la muestra saturada con superficie seca, (gr).	500	
Pa	Peso específico aparente = $A/(B+S-C)$		2,43
Pass	Peso específico aparente saturada y		2,46

	superficialmente seca = $S/(B+S-C)$		
Pn	Peso específico nominal = $A/(B+A-C)$		2,52
Am	Absorción máxima de agua (%) = $((S-A)/A)*100$		1,42

Fuente: Autor del Proyecto

**4.1.2.4 Cantidad de materia orgánica:** Cantidad de materia orgánica por medio del valor azul de metileno en agregados finos INVE 235-07

Se tomó una muestra de 10g de material pasado por el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No.200), en un vaso volumétrico se le adicionó 30 ml de agua destilada y se batió hasta tener una solución homogénea, con la bureta se le agregó Azul de Metileno a la muestra y se agitó durante un minuto luego se procedió a sacar una gota de la mezcla y se dejó caer sobre el papel filtro, se observó que se formara un anillo alrededor de la gota.

**Cálculos:**

C, Concentración de solución de Azul de metileno Mg Azul/ml solución = 1000/200

V, Solución de Azul de metileno requerida en la titulación ml = 14

W, Material seco utilizado en la prueba g = 10

$$VA = (C * V) / W$$

$$VA = (5 * 14) / 10 = 7$$

**Tabla 18. Valor de azul de metileno y el comportamiento esperado de la arena.**

<b>Valor de Azul de Metileno (mg/g)</b>	<b>Desempeño anticipado</b>
$\leq 6$	Excelente
<b>7 - 12</b>	Marginalmente aceptable
13 - 19	Problemas/Posible falla
$\geq 20$	Fallado

Fuente: Autor del Proyecto

### **4.1.3 Cemento**

**Figura 19. Foto del cemento**



Fuente: Autor del Proyecto

#### **4.1.3.1 Peso específico**

**Método de ensayo para determinar el peso específico del cemento hidráulico  
Norma técnica Colombiana para el sector de la construcción (ICONTEC 221).**

Se llenó el frasco Chatelier con Kerosene hasta un punto situado entre las marcas 0 y 1 ml, se limpió el interior del frasco y se agregó 64g de cemento en pequeñas cantidades observando que el cemento no se adhiriera a las paredes de

él, se colocó el tapón y se giró en posición inclinada, hasta no ascendieran burbujas a la superficie del líquido para sacarle el aire.

CÁLCULOS:

PESO ESPECIFICO =  $\frac{\text{Peso de cemento, en gr.}}{\text{Volumen desplazado, en ml}}$

$$\text{PESO ESPECÍFICO} = \frac{64 \text{ gr}}{(22.6 - 0.5)} = 2.89 \text{ gr/ml}$$

#### 4.1.3.2 Finura

**Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico Norma Técnica Colombiana para el sector de la construcción (ICONTEC 226).** Se tomaron 100gr de cemento, se tamizó con tapa, se retiró el fondo para pesa el material que pasó el tamiz 200.

**Figura 20. Determinación de la finura del cemento por el tamiz 200**



Tomado de la tesis Diseño de concretos de alta resistencia a partir de una puzolana natural.

CÁLCULOS:

F = Finura del cemento pasa el tamiz 200

$R_c$  = Residuo corregido  
 $R_s$  = Residuo retenido en el tamiz 200  
 $C$  = Factor de corrección del tamiz (0)  
 $R_c = R_s (100 + C)$   
 $R_c = 0.89\text{gr}$   
 $F = 100 - R_c$   
 $F = 99.11 \%$

## 4.2 RESULTADOS ENSAYOS A LAS PROBETAS

### 4.2.1 Resistencia A Compresión

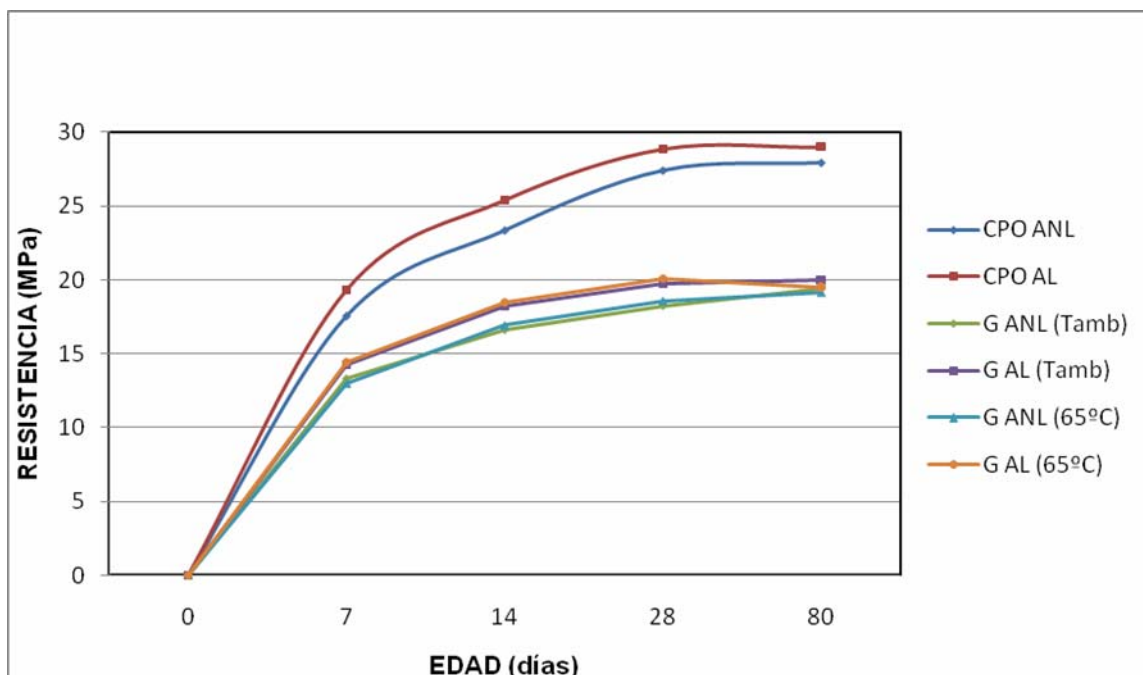
La resistencia a la compresión se determinó a edades de curado de 7,14, 28, y 80 días a cada una de las probetas preparadas. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 19. En la figura 21. Se muestra el comportamiento mecánico de los morteros activados alcalinamente frente a los morteros de OPC referencia.

**Tabla 19. Promedio aritmético de la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas.**

Días curado	CPO ANL MPa	CPO AL MPa	G ANL MPa	G AL MPa	G ANL 65 MPa	G AL 65 MPa
7	17,55	19,34	13,31	14,26	13,00	14,44
14	23,35	25,42	16,63	18,25	16,93	18,48
28	27,40	28,88	18,26	19,73	18,58	20,10
80	27,92	29,00	19,40	19,96	19,16	19,52

Fuente: Autor del Proyecto

Figura 21. Resistencia a la compresión de los morteros



Fuente: Autor del Proyecto

Como se puede apreciar en la figura 21. las mezclas que se elaboraron con arena lavada presentaron mejores resultados que las elaboradas con arena no lavada; esto podría ser debido a que la arena lavada está libre de materia orgánica o arcillas dañinas que afectan el desarrollo de la resistencia en los morteros.

Con base en los resultados de resistencia a la compresión obtenidos, las probetas que presentaron el mejor desempeño mecánico corresponden a las mezclas de CPO AL y CPO ANL con valores de 27.92 y 29.0 MPa, respectivamente a los 80 días de curado; las probetas geopoliméricas alcanzaron entre 66 y 75% de la resistencia adquirida por las probetas de CPO como se observa en la tabla 20. Las probetas curadas a 65°C durante 24 horas presentan una resistencia a la compresión ligeramente mayor que la de las probetas geopoliméricas curadas a temperatura ambiente; esta diferencia se ve marcada sólo a tempranas edades de curado, ya que hay una aceleración en la reacción de geopolimerización

(Bakharev, 2005; Palomo et al., 1999). En conclusión, la activación alcalina de la puzolana tiene un comportamiento cementante parecido al CPO.

Tabla 20: Resistencia a la compresion alcanzada a los diferentes días de curado de las probetas geopoliméricas con respecto a las probetas de referencia, expresada en porcentaje.

**Tabla 20. Comparación de resistencias a compresión expresada en (%)**

<b>Días curado</b>	<b>CPO ANL</b>	<b>CPO AL</b>	<b>G ANL</b>	<b>G AL</b>	<b>G ANL 65</b>	<b>G AL 65</b>
7	100	100	75,84	73,73	74,07	74,66
14	100	100	71,22	71,79	72,50	72,69
28	100	100	66,64	68,31	67,81	69,59
80	100	100	69,48	68,82	68,62	67,31

Fuente: Autor del Proyecto

#### **4.2.2 Resistencia A Altas Temperaturas**

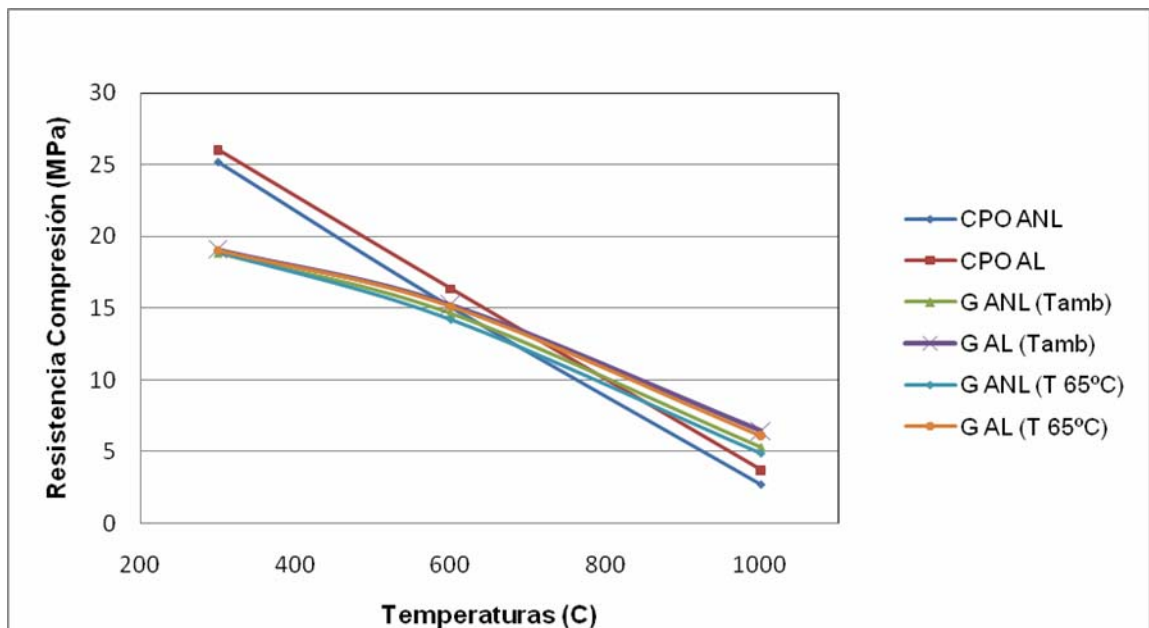
La resistencia a altas temperaturas fue determinada a los 28 días de curado y se determinó con base en la pérdida de peso y resistencia iniciales. Los resultados son sintetizados en la tabla 21 e ilustrados en la figura 22.

**Tabla 21. Promedio de la resistencia a la compresión de las diferentes probetas sometidas a altas temperaturas.**

<b>Temp (°C)</b>	<b>CPO ANL MPa</b>	<b>CPO AL MPa</b>	<b>G ANL MPa</b>	<b>G AL MPa</b>	<b>G ANL 65 MPa</b>	<b>G AL 65 MPa</b>
300	25,18	26,02	18,82	19,1	18,92	19
600	15,1	16,34	14,62	15,25	14,2	15,12
1000	2,74	3,7	5,3	6,45	4,88	6,12

Fuente: Autor del Proyecto

Figura 22. Resistencia a la compresión a altas temperaturas.



Fuente: Autor del Proyecto

Como se puede observar en la figura 22, las probetas geopoliméricas presentaron un comportamiento mecánico más estable frente a las altas temperaturas que las probetas de referencia como está indicado por las líneas de tendencia, en donde la pendiente de las líneas de tendencia de los geopolímeros es más suave que las del CPO.

En la tabla 22 podemos observar que los morteros de CPO presentaron pérdidas máximas en la resistencia entre 87% y 90% de la resistencia inicial expuestos a 1000°C; mientras que de los geopolímeros presentaron pérdidas en la resistencia entre 67 y 73% expuestos a esta misma temperatura.

**Tabla 22. Pérdida de resistencia a la compresión por las altas temperaturas, tomando como referencia las resistencias a los 28 días de curado de la tabla 19.**

<b>Pérdida de resistencia a compresión por calcinación (%)</b>						
<b>T°C</b>	<b>CPO ANL</b>	<b>CPO AL</b>	<b>G ANL</b>	<b>G AL</b>	<b>G65 ANL</b>	<b>G 65 AL</b>
300	8,1	9,9	3,06	3,19	1,82	2,21
600	44,89	43,42	19,93	22,7	23,57	24,77
1000	90	87,18	70,97	67,3	73,73	69,5

Fuente: Autor del Proyecto

La pérdida de peso en las probetas fue determinada para los diferentes rangos de temperaturas a que fueron expuestas tabla 23. Y comparadas con los pesos iniciales la disminución de pesos fue expresada en porcentajes como se ilustra en la figura 23.

La pérdida de humedad inicial a (300 °C) en las mezclas varió entre 8.15 y 8.80% del peso inicial de las probetas elaboradas con CPO; mientras que las probetas geopoliméricas para esta misma temperatura perdieron alrededor de 5,41 y 6,78 % del peso inicial, lo cual es debido a la pérdida de agua capilar; de los (600 °C) a los (1000 °C) la pérdida de peso para las probetas de CPO osciló entre (9.82 a 12.66%) y está relacionado con la deshidratación de los minerales arcillosos y liberación de CO<sub>2</sub>. Mientras que las probetas geopoliméricas sólo perdieron un 6,64 y 9,29% para las mezclas geopoliméricas G Tamb y G 65°C respectivamente.

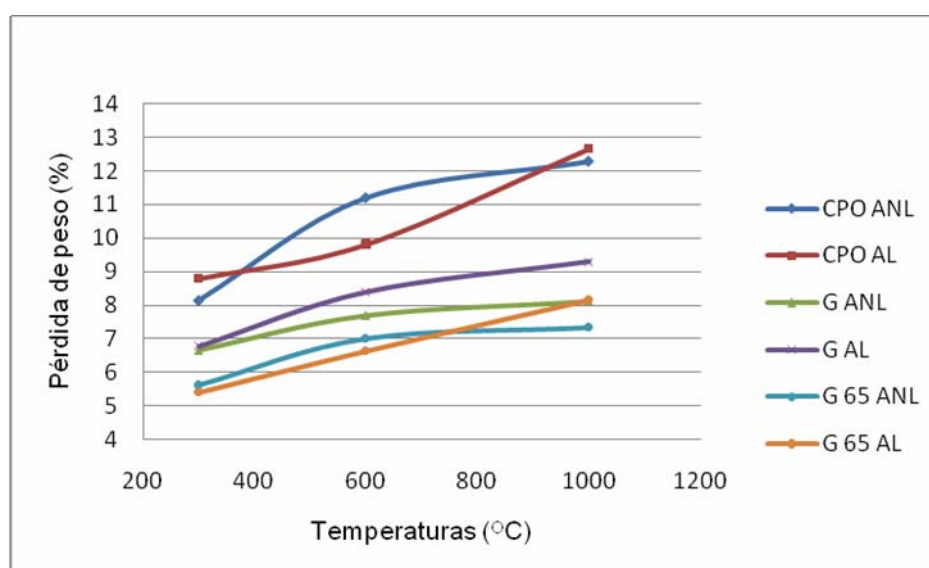
En conclusión las probetas geopoliméricas presentaron un mejor comportamiento frente a las altas temperaturas que las probetas de CPO; disminuyendo en menor cantidad los valores de resistencia a la compresión y peso inicial.

Tabla 23. Pérdida de peso

	T (°C)	Pérdida de peso (%)		
		CPO	Tamb	T 65 °C
<b>Arena no lavada</b>	300	8,15	6,65	5,62
	600	11,2	7,7	7,02
	1000	12,28	8,13	7,35
<b>Arena lavada</b>	300	8,8	6,78	5,41
	600	9,82	8,39	6,64
	1000	12,66	9,29	8,16

Fuente: Autor del Proyecto

Figura 23. Pérdida de peso de las probetas por las altas temperaturas expresado en porcentajes.



Fuente: Autor del Proyecto

#### 4.2.3 Ataque Con Sulfatos

Los especímenes se expusieron a inmersión después de 21 de curados en una solución de  $MgSO_4$  de concentración 50g/L a pH controlado. Se evaluó la pérdida

de masa y de resistencia mecánica; Para cada número de semanas se ensayaron dos probetas a compresión donde se pudo observar como disminuía la resistencia debido a la interacción fisicoquímica entre los minerales de la pasta de cemento y los iones de sulfato del medio, teniendo como consecuencia la expansión, agrietamiento, pérdida de masa y desintegración del mortero.

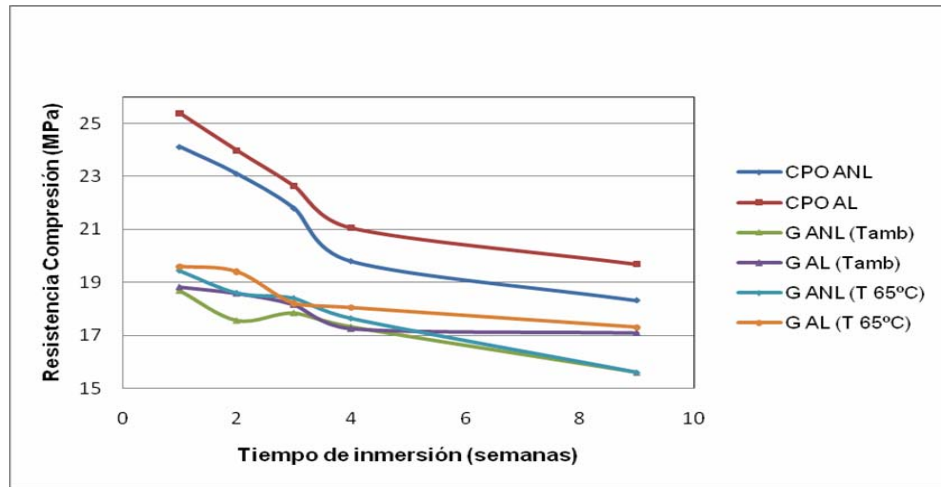
En la grafica 24 se observa que las probetas elaboradas con CPO se ven más afectadas por el ataque con sulfato de magnesio que las probetas geopoliméricas, en comparación con la resistencia inicial; las probetas de CPO tuvieron una pérdida de hasta 30,08 % de resistencia a la compresión estimada a los 21 días de curado( figura 24) después de las 9 semanas de estar inmersas; a diferencia de las probetas geopoliméricas que sólo presentaron una pérdida de 12,63 % para este mismo periodo de tiempo.

**Tabla 24. Promedio de la resistencia a la compresión de las diferentes probetas sometidas a ataque con MgSO<sub>4</sub>.**

<b>Semanas</b>	<b>CPO ANL MPa</b>	<b>CPO AL MPa</b>	<b>G ANL MPa</b>	<b>G AL MPa</b>	<b>G ANL 65 MPa</b>	<b>G AL 65 MPa</b>
1	24,12	25,38	18,68	18,82	19,44	19,6
2	23,1	23,98	17,56	18,58	18,6	19,4
3	21,8	22,64	17,84	18,16	18,4	18,2
4	19,8	21,06	17,32	17,26	17,64	18,04
9	18,32	19,96	15,6	17,1	15,6	17,3

Fuente: Autor del Proyecto

Figura 24. Resistencia a la compresión por el ataque con sulfato de magnesio (MgSO<sub>4</sub>).



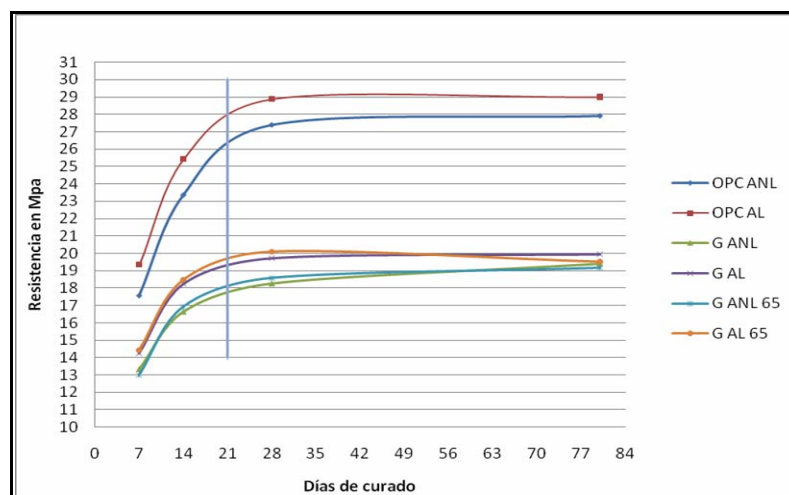
Fuente: Autor del Proyecto

Tabla 25. Valores de resistencia a la compresión estimados a los 21 días de curado.

CPO ANL	CPO AL	G ANL	G AL	G ANL 65	G AL 65
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
26,2	28	17,8	19,4	18,1	19,8

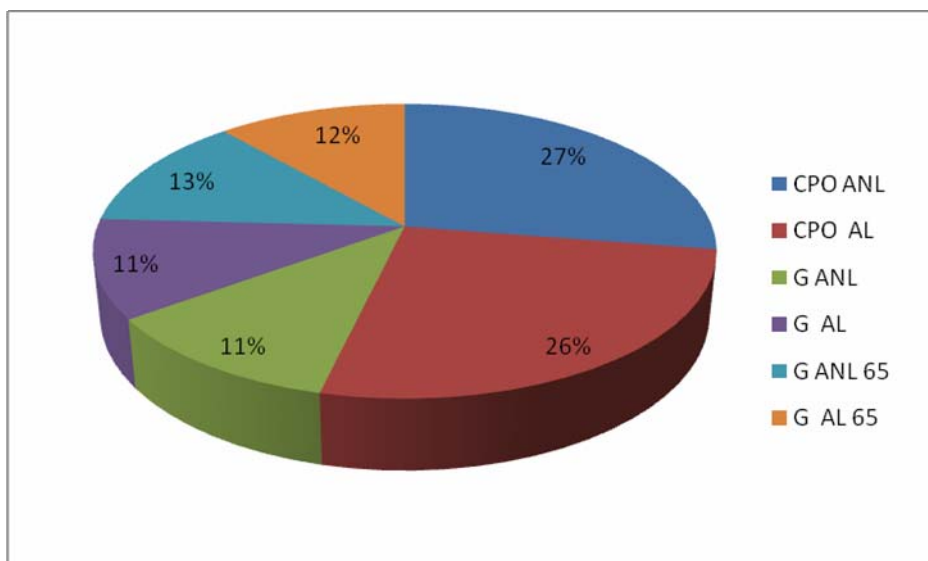
Fuente: Autor del Proyecto

Figura 25. Gráfica de los valores estimados de la resistencia a la compresión a los 21 días de curado.



Fuente: Autor del Proyecto

**Figura 26. Diagrama donde se muestra la pérdida de resistencia al ataque con MgSO<sub>4</sub>**



Fuente: Autor del Proyecto

**Tabla 26. Porcentajes de la pérdida de resistencia a la compresión por el ataque con MgSO<sub>4</sub>**

Semanas	CPO ANL (%)	CPO AL (%)	G ANL (%)	G AL (%)	G ANL 65 (%)	G AL 65 (%)
9	30,08	28,71	12,36	11,86	13,81	12,63

Fuente: Autor del Proyecto

**Tabla 27. Porcentaje de pérdida de peso por el ataque con MgSO<sub>4</sub>.**

Semanas	CPO ANL (%)	CPO AL (%)	G ANL (%)	G AL (%)	G ANL 65 (%)	G AL 65 (%)
9	1,1	0,63	0,6	0,48	0,87	0,37

Fuente: Autor del Proyecto

Como se puede apreciar en la tabla 27 la disminución del peso por al ataque con sulfato de magnesio durante las 9 semanas de inmersión fue mínimo para todas probetas, pero comportandose mejor las probetas geopoliméricas.

#### 4.2.4 Ataque Con Ácidos

A una edad de 21 días de curado, 9 probetas de cada mezcla se sumergieron en una solución de ácido sulfúrico con un PH de 1; a los especímenes se les evaluó resistencia a la compresión, cambio de masa y variación en la longitud de los lados después de ser sumergidos en ácido durante 1, 2, 3, 4 y 9 semanas, para cada día estipulado se ensayaron dos probetas de cada mezcla.

Figura 27 muestra la evolución de la resistencia a la compresión de morteros geopoliméricos y morteros de CPO en medio ácido. A intervalos regulares, la resistencia a la compresión se determinó y se expresó como porcentaje de la resistencia a la compresión inicial.

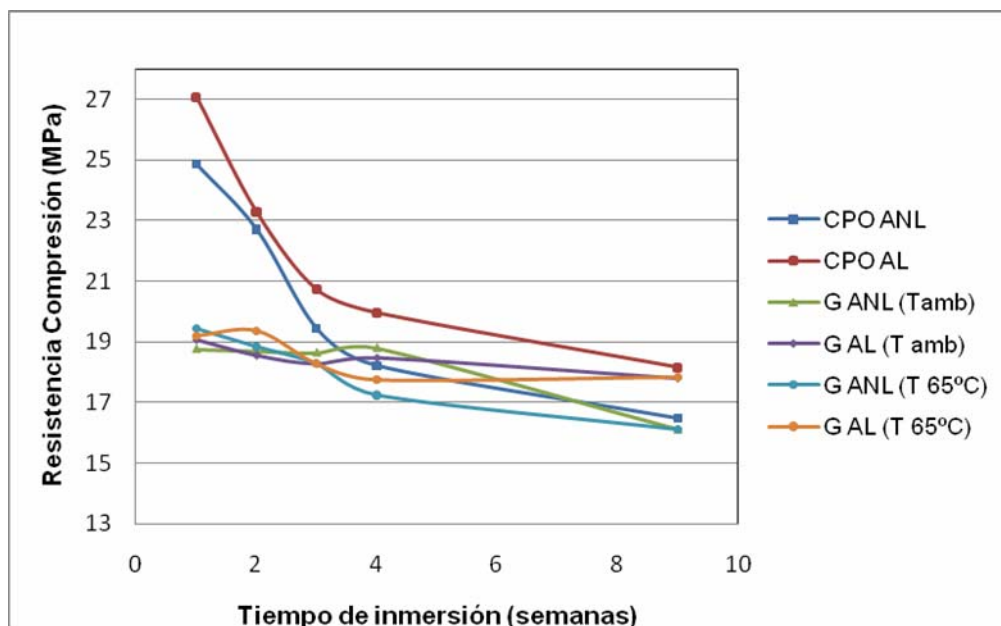
Las probetas de CPO tuvieron una pérdida de resistencia a lo largo de todas las semanas con una tendencia de forma similar. Las muestras de mortero geopolimérico mostraron muy poca pérdida de resistencia inicialmente. Después de la exposición en la solución de ácido sulfúrico durante 9 semanas, la pérdida de resistencia a la compresión se encontró del 37,09% y 35,14% para las mezclas de OPC ANL y OPC AL respectivamente; para las mezclas geopoliméricas fue de 9,55%, 8,24%, 11,4% y 9,84 GANL, G AL, G65 ANL y G 65 AL respectivamente.

**Tabla 28. Promedio de la resistencia a la compresión de las diferentes probetas sometidas a ataque con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.**

Semanas	CPO ANL MPa	CPO AL MPa	G ANL MPa	G AL MPa	G ANL 65 MPa	G AL 65 MPa
1	24,86	27,08	18,76	19,08	19,44	19,2
2	22,71	23,28	18,7	18,56	18,84	19,36
3	19,44	20,72	18,64	18,28	18,28	18,28
4	18,22	19,96	17,8	18,48	17,24	17,76
9	16,48	18,16	16,1	17,8	16,1	17,85

Fuente: Autor del Proyecto

**Figura 27. Resistencia a la compresión al ataque con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.**



Fuente: Autor del Proyecto

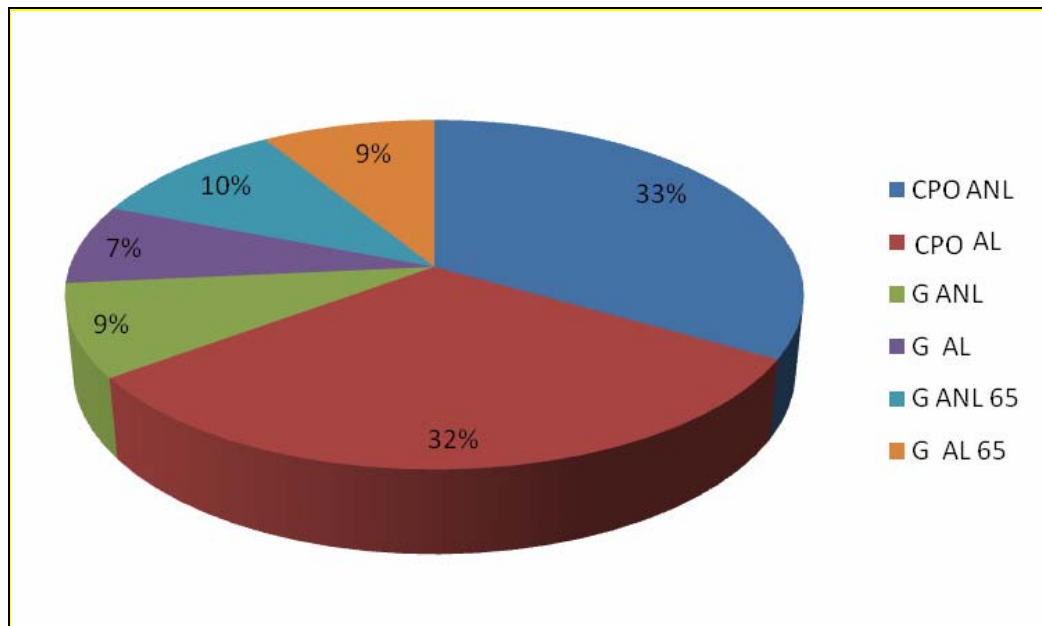
**Tabla 29. Porcentaje de la pérdida de resistencia a la compresión en la novena semana.**

Semanas	CPO ANL (%)	CPO AL (%)	G ANL (%)	G AL (%)	G ANL 65 (%)	G AL 65 (%)
9	37,09	35,14	9,55	8,24	11,40	9,84

Fuente: Autor del Proyecto

Como se observa en la tabla 29 y en la figura 28 la pérdida de resistencia a la compresión fue mayor en las mezclas de OPC ANL y OPC AL, comparado con las mezclas de G AL, G ANL, G65 ANL y G65 AL.

**Figura 28. Diagrama donde se muestra la pérdida de resistencia al ataque con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**



Fuente: Autor del Proyecto

La influencia de la formación de pequeñas grietas no se consideró ya que fue difícil de cuantificar.

No se observaron daños en la superficie de las muestras de prueba después de la exposición a la solución de sulfato de magnesio hasta las 9 semanas, ni cambios significativos en el peso a lo largo de todo el período de inmersión, por lo que sólo se presenta la tabla de disminución de la última semana.

**Tabla 30. Porcentaje de pérdida de peso por el ataque con ácido sulfúrico**

Semanas	CPO ANL (%)	CPO AL (%)	G ANL (%)	G AL (%)	G ANL 65 (%)	G AL 65 (%)
9	1,53	0,69	0,84	0,55	0,65	0,54

Fuente: Autor del Proyecto

#### 4.2.5 Porosidad

Se determinó el volumen de poros y densidad a los morteros con una edad de curado de 28 días. Los resultados obtenidos son listados en la tabla 31, donde se puede observar que los morteros geopoliméricos presentaron una porosidad mayor respecto a aquellos a base de CPO.

Esto puede ser atribuido a que la puzolana para la presente investigación no presentó una finura igual a la del CPO, Como se mostró en sus respectivos ensayos de finura.

Tabla 31. Porosidad y densidad de las probetas.

	CPO ANL	CPO AL	G ANL	G AL	G65 ANL	G65 AL
<b>Vol total</b>	121,43	131,48	120,14	119,9	119,26	126,68
<b>Vol de vacíos</b>	12,34	14,53	25,05	17,29	26,90	25,82
<b>Porosidad</b>	10,16	11,05	20,85	14,42	22,55	20,38
<b>Densidad seca</b>	2,01	1,98	1,69	1,87	1,63	1,67

## 5. CONCLUSIONES

- Los resultados de los ensayos realizados para determinar la evolución y el desarrollo de resistencias mecánicas en los morteros geopoliméricos, mostraron que la mayoría de los factores (relación agua/cemento, condiciones de curado, etc.) que afectan al proceso de fabricación y propiedades finales (porosidad, resistencia mecánica y durabilidad) de los morteros de cemento portland también afectan la preparación y calidad final de los morteros geopoliméricos.
- En términos generales, los morteros de activación alcalina de la puzolana, presentan cualidades mecánicas y de durabilidad que los catalogan como un material de aceptable calidad, comparado con el CPO
- Las probetas de mortero geopolimérico a partir de la activación alcalina de la puzolana no mostraron ningún cambio reconocible de color después de estar inmersas 9 semanas en solución de ácido sulfúrico de PH = 1 y sulfato de magnesio 50 g/l, preservándose estructuralmente intactos.
- El ataque con soluciones de ácido sulfúrico y sulfato de magnesio produjo pérdidas de peso muy bajo en el rango de 0.54 - 0.84 % y 0.37 - 0.87 %, respectivamente, en las muestras geopoliméricas, en comparación con las muestras de CPO que tuvieron una pérdida mayor en sulfato de magnesio y ácido sulfúrico de 0.63 - 1.1 % y 0.69 - 1.53%, respectivamente, después de 9 semanas de estar inmersas en estas soluciones; confirmando su alta resistencia contra el ataque de ácido sulfúrico y sulfato de magnesio como afirman algunos autores en estudios anteriores.

- Los geopolímeros que se curaron durante 24 horas a 65°C mostraron una porosidad más alta que los geopolímeros curados a temperatura ambiente, lo cual es debido a que la reacción de geopolimerización (solución activante-puzolana) se lleva a cabo de forma rápida generando la formación de una fase amorfa y otra semicristalina, lo que, al principio es positivo para el desarrollo de la resistencia a la compresión pero, debido a que los productos reaccionantes tienen una estructura poco ordenada, la pasta de cemento se vuelve más porosa y la resistencia a la compresión a partir de los 28 días se empieza a debilitar.
- Los morteros activados con álcalis alcanzaron resistencias a la compresión de hasta un 67,31 - 69,48 % de la resistencia de probetas elaboradas con cemento portland a los 80 días de curado. Los morteros geopoliméricos que alcanzaron las mayores resistencias a la compresión fueron aquellos que se elaboraron con arena lavada y curados a 65 °C, seguido de los activados con arena lavada, pero curados a temperatura ambiente; lo que demuestra la importancia de utilizar arenas limpias o libres de materia orgánica para alcanzar altas resistencias.
- Los resultados de este estudio revelan que los morteros obtenidos a partir de la activación alcalina de puzolana presentan ventajas comparativas con relación al mortero de cemento portland ordinario a nivel de sus propiedades fisicomecánicas y de durabilidad (ataque con ácidos, sulfatos y comportamiento a las altas temperaturas).

## RECOMENDACIONES

- Los resultados obtenidos en este trabajo permiten evaluar el uso de los materiales volcánicos con gran actividad puzolánica en la preparación de materiales cementantes ambientalmente amigables.
- Realizar pruebas adicionales con el fin de investigar los efectos de la cantidad de puzolana como aditivo en la preparación de geopolímeros, relación solución activante-material cementante, así como el uso de diferentes tipos de materia prima.
- Realizar pruebas que permitan conocer la adherencia geopolímero-acero para su posible aplicación en concretos estructurales.
- Incorporar diferentes tipos de residuos sólidos en la preparación de materiales cementantes para aumentar el valor agregado de los procesos industriales reciclando estos residuos para darles un manejo ambiental y disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero producida por la industria cementera.

## BIBLIOGRAFIA

ALONSO, S. and Palomo, A., Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solids ratio, *Materials Letters*, 47, 55-62, (2001a).

ALONSO, S. and Palomo, A., Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide-metakaolin solid mixtures, *Cement and Concrete Research*, 31, 1, 25-30, (2001b).

ASTM- 618 C Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

BAKHAREV, T., Geopolymeric materials prepared using class F fly ash and elevated curing temperature, *Cement and Concrete Research*, 35, 6, 1224-1232, (2005).

BARBOSA, V. F. F., Mackenzie, K. J. D. and Thaumaturgo, C., Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers, *International Journal of Inorganic Materials*, 2, 309-317, (2000).

BARBOSA, V. F. F. and Mackenzie, K. J. D., Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate, *Materials Research Bulletin*, 38, 2, 319-331, (2003).

BARBOSA, V. F. F. and Mackenzie, K. J. D., Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate, *Materials Research Bulletin*, 38, 2, 319-331, (2003).

CHENG, T. W. and Chiu, J. P., Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering*, 16, 3, 205-210, (2003).

DAVIDOVITS, J. (1988). Soft Mineralurgy and Geopolymers. In: Davidovits, J., Orlinski, J. (Eds.), *Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer 88*, vol. 1, Compiègne, France, 1–3 June, pp. 19–23.

DAVIDOVITS, J., Global warming impact on the cement and aggregates industries, *World Resource Review*, 6, 2, 263-278, (1994).

DAVIDOVITS, J., Chemistry of geopolymeric systems, terminology, in: *The Proceedings of Geopolymere '99*, St. Quentin, France, 9-39, (1999).

DAVIDOVITS, J. and Davidovics, M., Geopolymer: room-temperature ceramic matrix for composites, *Ceramics Engineering Science Process*, 9, 7-8, 835-842, (1998).

DAVIDOVITS, J., Method of obtaining a geopolymeric binder allowing to stabilise, solidify and consolidate toxic or waste materials, *United States Patent 5,539,140*, (1996).

DAVIDOVITS, J., Geopolymers: inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633-1656, (1991).

ESCALANTE, J., *Materiales alternativos al cemento portland*, vol. 21 (2002)

FAIMON, J., Oscillatory silicon and aluminum aqueous concentrations during experimental aluminosilicate weathering, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 2901-2907, (1996).

FERNANDEZ-JIMENEZ, A., Palomo, A. and Lopez-Hombrados, C., Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete, *ACI Materials Journal*, 103, 2, 106-112, (2006c).

FERNANDEZ-JIMENEZ, A. and Palomo, A., Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator, *Cement and Concrete Research*, 35, 1984-1992, (2005).

FERNANDEZ-JIMENEZ, A. and Palomo, A., Alkali-activated fly ash concrete: alternative material for the precast industry, in: *The Proceedings of Geopolymer 2002 - Turn Potential into Profit (CD-ROM)*, Melbourne, Australia, (2002).

GARTNER E. "Industrially interesting Approaches to low CO<sub>2</sub> Cements". *Cement and Concrete research*, V34, 2004, pp.1489-1498.

ICONTEC- 220, Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado

ICONTEC- 221 Establece el método de ensayo para determinar el peso específico del cemento hidráulico

ICONTEC- 226 Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico sobre los tamices I(contec 74 $\mu$  y 149  $\mu$ .)

INVE-123 Análisis granulométrico por tamizado de agregados finos.

INVE-222 Establecer el método para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino.

INVE-235-07 Valor azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales.

J. DAUBE, R. Bakker, Blended cement ASTM STP 897, G. Frohnsdorff, ed. (ASTM, Philadelphia, 1986) p. 5.

KOSMATKA H., (2004). Diseño y Control de Mezclas de Concreto, EU, Portland Cement Association.

KHALIL, M. Y. and Merz, E., Immobilization of intermediate-level wastes in geopolymers, Journal of Nuclear Materials, 211, 141-148, (1994).

KRIVENKO, P. V. and Kovalchuk, G. Y., Heat-resistant fly ash-based geocements, in: The Proceedings of Geopolymers 2002 - Turn Potential Into Profit (CD-ROM), Melbourne, Australia, (2002).

McCormick, A. V., Bell, A. T. and Radke, C. J., Evidence from alkali-metal NMR spectroscopy for ion pairing in alkaline silicate solutions, Journal of Physical Chemistry, 93, 5, 1733-1737, (1989a).

METSO, J., The alkali reaction of alkali-activated finnish blast furnace slag, Silic. Ind., 47, 4-5, 123-127, (1982).

MORANVILLE-REGOURD M. "Portland cement based binders cement for the next millennium". Modern Concrete Materials, Dundee, 1999, pp.88-100.

M. TUFEKCI et al., Cement and Concrete Res. 27, 1713 (1997).

NEVILLE M. A. (1999). Tecnología del concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del concreto. Primera Edición.

NEVILLE, A. M., Properties of Concrete, Essex, Longman, (1995).

PALOMO, A., Grutzeck, M. W. and Blanco, M. T., Alkali-activated fly ashes: a cement for the future, Cement and Concrete Research, 29, 8, 1323-1329, (1999b).

PALOMO, A. and Palacios, M., Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrice for the immobilization of hazardous wastes – Part I. Stabilisation of chromium and lead, Cement and Concrete Research, 33, 2, 289-295, (2003).

PALOMO, A. and Glasser, F. P., Chemically-bonded cementitious materials based on metakaolin, British Ceramic Transactions Journal, 91, 107-112, (1992).

PHAIR, J. W. and Van Deventer, J. S. J., Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers, Minerals Engineering, 14, 3, 289-304, (2001).

RAHIER, H., Mele, B. V. and Wastiels, J., Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses. Part II. Rheological transformation during low-temperature cure and high temperature properties of a model compound, Journal of Materials Science, 31, 80-85, (1996).

ROY, D. M., Alkali-activated cements: Opportunities and challenges, Cement and Concrete Research, 29, 249-254, (1999).

ROY D.M, Silsbee M.R. "Novel cement and cement products for application in the 21th century". Symposium Concrete technology, present past and future, ACI SP144, 1994, pp.349-382.

VAN JAARSVELD, J. G. S., Van Deventer, J. S. J. and Schwartzman, A., The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics, *Minerals Engineering*, 12, 1, 75-91, (1999).

VAN JAARSVELD, J. G. S., Van Deventer, J. S. J. and Schwartzman, A., The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics, *Minerals Engineering*, 12, 1, 75-91, (1999).

VAN JAARSVELD, J. G. S., Van Deventer, J. S. J. and Lukey, G. C., The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers, *Chemical Engineering Journal*, 89, 1-3, 63-73, (2002).

VAN JAARSVELD, J. G. S., Van Deventer, J. S. J. and Lorenzen, L., The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications, *Minerals Engineering*, 10, 7, 659-669, (1997).

XU, H. and Van Deventer, J. S. J., Geopolymerisation of multiple minerals, *Minerals Engineering*, 15, 1131-1139, (2002a).

XU, H. and Van Deventer, J. S. J., The geopolymerisation of alumino-silicate minerals, *International Journal of Mineral Processing*, 59, 247-266, (2000b).

## ANEXOS

### ANEXO A: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO CON CEMENTO PORTLAND ORDINARIO DE 50 mm.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO CON CEMENTO PORTLAND ORDINARIO DE 50 mm						
	Nº Cilindro	Fecha de Fundición	Fecha de Rotura	Edad Probeta	Carga Máx.	Resistencia
				(Días)	(KN)	Comp. (MPa)
<b>ARENA NO LAVADA</b>	47	17/10/2009	24/10/2009	7	41.9	16.76
	48	17/10/2009	24/10/2009	7	45.8	18.34
	49	17/10/2009	31/10/2009	14	61.2	24.48
	50	17/10/2009	31/10/2009	14	53.4	21.38
	51	17/10/2009	31/10/2009	14	60.4	24.19
	52	17/10/2009	14/11/2009	28	65.0	26.00
	53	17/10/2009	14/11/2009	28	70.2	28.08
	54	17/10/2009	14/11/2009	28	68.3	27.32
	46	17/10/2009	05/01/2010	80	69.8	27.92
<b>ARENA LAVADA</b>	38	17/10/2009	24/10/2009	7	47.3	18.92
	39	17/10/2009	24/10/2009	7	49.4	19.76
	40	17/10/2009	31/10/2009	14	61.1	24.44
	41	17/10/2009	31/10/2009	14	62.9	25.16
	42	17/10/2009	31/10/2009	14	66.7	26.68
	43	17/10/2009	14/11/2009	28	77.2	30.88
	44	17/10/2009	14/11/2009	28	66.5	26.60
	45	17/10/2009	14/11/2009	28	72.9	29.16
	37	17/10/2009	05/01/2010	80	72.5	29.0

**ANEXO B: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO CON OPC DE 50 mm  
A ALTAS TEMPERATURAS**

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO CON OPC DE 50 mm A ALTAS TEMPERATURAS</b>									
	Nº Cilindro	Fecha de Fundición	T (°C)	Peso (gr)		Fecha de Rotura	Edad Probeta (Días)	Carga Máx. (KN)	Resistencia Comp. (MPa)
				Inicial	Final				
<b>ARENA NO LAVADA</b>	55	19/10/2009	300	250,93	229,6	17/11/2009	28	64.2	25.68
	56	19/10/2009	300	264.37	243,7	17/11/2009	28	61.7	24.68
	57	19/10/2009	600	253,11	225,3	17/11/2009	28	40.0	16.00
	58	19/10/2009	600	244,90	216.9	17/11/2009	28	35.5	14.20
	59	19/10/2009	1000	242,75	212,3	17/11/2009	28	7.30	2.92
	60	19/10/2009	1000	254,57	223,9	17/11/2009	28	6.40	2.56
<b>ARENA LAVADA</b>	61	19/10/2009	300	257,64	233,8	17/11/2009	28	66.2	26.48
	62	19/10/2009	300	250,30	229,4	17/11/2009	28	63.9	25.56
	63	19/10/2009	600	255,40	230,5	17/11/2009	28	38.9	15.56
	64	19/10/2009	600	258,41	232,8	17/11/2009	28	42.8	17.12
	65	19/10/2009	1000	246,48	215,3	17/11/2009	28	8.4	3.36
	66	19/10/2009	1000	250,37	218,6	17/11/2009	28	10.12	4.05

**ANEXO C: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO DE 50 mm  
SOMETIDOS AL ATAQUE CON MgSO<sub>4</sub>**

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO DE 50 mm SOMETIDOS AL ATAQUE CON MgSO<sub>4</sub></b>								
	<b>Nº Cilindro</b>	<b>Fecha de Fundición</b>	<b>Peso (gr)</b>		<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Edad Probeta (Semanas)</b>	<b>Carga Máx. (KN)</b>	<b>Resistencia Comp. (MPa)</b>
			<b>Inicial</b>	<b>Final</b>				
<b>ARENA NO LAVADA</b>	1	15/10/2009	262.30	259.40	7/01/2010	9	45.8	18.32
	2	15/10/2009	256.83	255.10	12/11/2009	1	62.3	24.92
	3	15/10/2009	260.94	259.49	12/11/2009	1	58.3	23.32
	4	15/10/2009	265.72	264.90	19/11/2009	2	59.8	23.92
	5	15/10/2009	267.65	265.87	19/11/2009	2	55.6	22.24
	6	15/10/2009	258.84	257.31	26/11/2009	3	56.2	22.48
	7	15/10/2009	254.70	253.25	26/11/2009	3	52.8	21.12
	8	15/10/2009	265.56	257.25	3/12/2009	4	47.0	18.80
	9	15/10/2009	258.41	260.92	3/12/2009	4	52.4	20.96
<b>ARENA LAVADA</b>	19	16/10/2009	250.30	249.10	13/11/2009	1	65.6	26.24
	20	16/10/2009	257.64	256.80	13/11/2009	1	61.3	24.52
	21	16/10/2009	253.11	251.32	20/11/2009	2	56.9	22.76
	22	16/10/2009	250.30	248.93	20/11/2009	2	63.0	25.20
	23	16/10/2009	244.88	273.95	27/11/2009	3	55.5	22.20
	24	16/10/2009	246.08	273.29	27/11/2009	3	57.7	23.08
	25	16/10/2009	261.11	252.11	4/12/2009	4	62.3	24.92
	26	16/10/2009	250.93	256.91	4/12/2009	4	43.0	17.20
	27	16/10/2009	258.41	256.78	8/01/2010	9	49.9	19.96

**ANEXO D: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO DE 50 mm  
SOMETIDOS AL ATAQUE CON H2SO4**

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO DE 50 mm SOMETIDOS AL ATAQUE CON H2SO4</b>								
	<b>Nº Cilindro</b>	<b>Fecha de Fundición</b>	<b>Peso (gr)</b>		<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Edad Probeta (Semanas)</b>	<b>Carga Máx. (KN)</b>	<b>Resistencia Comp. (MPa)</b>
			<b>Inicial</b>	<b>Final</b>				
<b>ARENA NO LAVADA</b>	10	15/10/2009	247.18	246.00	12/11/2009	1	55.8	22.32
	11	15/10/2009	254.70	253.50	12/11/2009	1	68.5	27.40
	12	15/10/2009	245.89	243.98	19/11/2009	2	55.5	22.22
	13	15/10/2009	265.23	264.45	19/11/2009	2	58.0	23.20
	14	15/10/2009	246.96	247.74	26/11/2009	3	53.3	21.32
	15	15/10/2009	265.72	264.72	26/11/2009	3	43.9	17.56
	16	15/10/2009	257.31	256.57	3/12/2009	4	48.4	19.36
	17	15/10/2009	231.64	230.45	3/12/2009	4	42.7	17.08
	18	15/10/2009	267.35	263.31	7/01/2010	9	41.2	16.48
<b>ARENA LAVADA</b>	28	16/10/2009	269.56	271.89	13/11/2009	1	73.7	29.48
	29	16/10/2009	265.12	266.79	13/11/2009	1	61.7	24.68
	30	16/10/2009	256.45	254.86	20/11/2009	2	59,2	23.68
	31	16/10/2009	245.69	243.35	20/11/2009	2	57,2	22.88
	32	16/10/2009	253.55	256.55	27/11/2009	3	53,7	21.48
	33	16/10/2009	249.32	251.80	27/11/2009	3	49,9	19.96
	34	16/10/2009	255.43	255.45	4/12/2009	4	51.6	20.64
	35	16/10/2009	240.11	238.39	4/12/2009	4	43.4	17.36
	36	16/10/2009	265.73	263.89	8/01/2010	9	45.4	18.16

**ANEXO E: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE  
50 mm T Amb**

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm T Amb</b>						
	<b>Nº Cilindro</b>	<b>Fecha de Fundición</b>	<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Edad Probeta</b>	<b>Carga Máx.</b>	<b>Resistencia</b>
				<b>(Días)</b>	<b>(KN)</b>	<b>Comp. (MPa)</b>
<b>ARENA NO LAVADA</b>	47	23/10/2009	31/10/2009	7	35.2	14.08
	48	23/10/2009	31/10/2009	7	31.3	12.53
	49	23/10/2009	7/11/2009	14	41.2	16.48
	50	23/10/2009	7/11/2009	14	43.7	17.48
	51	23/10/2009	7/11/2009	14	39.9	15.96
	52	23/10/2009	21/11/2009	28	49.7	19.89
	53	23/10/2009	21/11/2009	28	46.1	18.44
	54	23/10/2009	21/11/2009	28	41.1	16.44
<b>ARENA LAVADA</b>	46	23/10/2009	11/1/2010	80	48.5	19.4
	37	23/10/2009	31/10/2009	7	37.7	15.08
	38	23/10/2009	31/10/2009	7	33.6	13.44
	39	23/10/2009	7/11/2009	14	43.3	17.32
	40	23/10/2009	7/11/2009	14	48.4	19.36
	41	23/10/2009	7/11/2009	14	45.2	18.08
	42	23/10/2009	21/11/2009	28	54.5	21.8
	43	23/10/2009	21/11/2009	28	43.9	17.56
	44	23/10/2009	21/11/2009	28	49.6	19.84
45	23/10/2009	11/1/2010	80	49.9	19.96	

**ANEXO F: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm A ALTAS TEMPERATURAS**

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm A ALTAS TEMPERATURAS</b>									
	Nº Cilindro	Fecha de Fundición	T (°C)	Peso (gr)		Fecha de Rotura	Edad Probeta (Días)	Carga Máx. (KN)	Resistencia Comp. (MPa)
				Inicial	Final				
<b>ARENA NO LAVADA</b>	55	24/10/2009	300	224.4	209.9	23/11/2009	28	45.8	18.32
	56	24/10/2009	300	235.4	219.3	23/11/2009	28	48.3	19.32
	57	24/10/2009	600	208.7	191.1	23/11/2009	28	39.5	15.8
	58	24/10/2009	600	236.5	219.8	23/11/2009	28	33.5	13.4
	59	24/10/2009	1000	220.0	200.3	23/11/2009	28	10.3	4.12
	60	24/10/2009	1000	239.6	221.9	23/11/2009	28	16.2	6.48
<b>ARENA LAVADA</b>	61	24/10/2009	300	235.6	224.4	23/11/2009	28	44.8	17.92
	62	24/10/2009	300	237.4	216.5	23/11/2009	28	50.7	20.2
	63	24/10/2009	600	240.2	223.5	23/11/2009	28	41.0	16.4
	64	24/10/2009	600	229.0	206.3	23/11/2009	28	35.2	14.1
	65	24/10/2009	1000	227.9	202.7	23/11/2009	28	18.2	7.3
	66	24/10/2009	1000	226.1	209.2	23/11/2009	28	14.0	5.6

**ANEXO G: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICO DE  
50 mm SOMETIDOS A MgSO4**

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICO DE 50 mm SOMETIDOS A MgSO4</b>								
	<b>Nº Cilindro</b>	<b>Fecha de Fundición</b>	<b>Peso (gr)</b>		<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Edad Probeta (Semanas)</b>	<b>Carga Máx. (KN)</b>	<b>Resistencia Comp. (MPa)</b>
			<b>Inicial</b>	<b>Final</b>				
<b>ARENA NO LAVADA</b>	10	19/10/2009	225.16	223.8	12/1/2010	9	39.0	15.6
	11	19/10/2009	224.70	222.9	17/11/2009	1	48.6	19.44
	12	19/10/2009	241.57	241.83	17/11/2009	1	44.8	17.92
	13	19/10/2009	236.60	236.19	24/11/2009	2	39.5	15.8
	14	19/10/2009	211.46	220.42	24/11/2009	2	48.3	19.32
	15	19/10/2009	234.89	239.93	1/12/2009	3	43.3	17.32
	16	19/10/2009	235.23	234.11	1/12/2009	3	45.9	18.36
	17	19/10/2009	231.53	229.45	8/12/2009	4	44.2	17.68
	18	19/10/2009	228.45	227.21	8/12/2009	4	42.4	16.96
<b>ARENA LAVADA</b>	28	21/10/2009	222.76	228.16	19/11/2009	1	47.2	18.88
	29	21/10/2009	227.50	230.06	19/11/2009	1	46.9	18.76
	30	21/10/2009	230.81	234.99	26/11/2009	2	49.5	19.8
	31	21/10/2009	235.84	239.42	26/11/2009	2	43.4	17.36
	32	21/10/2009	228.14	241.71	3/12/2009	3	46.8	18.72
	33	21/10/2009	238.77	235.64	3/12/2009	3	44.0	17.60
	34	21/10/2009	241.75	243.39	10/12/2009	4	43.7	17.48
	35	21/10/2009	237.44	247.17	10/12/2009	4	42.6	17.04
	36	21/10/2009	223.19	222.1	14/1/2010	9	42.7	17.1

**ANEXO H: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE  
50 mm SOMETIDOS A ACIDO SULFURICO**

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm SOMETIDOS A ACIDO SULFURICO</b>								
	<b>Nº Cilindro</b>	<b>Fecha de Fundición</b>	<b>Peso (gr)</b>		<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Edad Probeta (Semanas)</b>	<b>Carga Máx. (KN)</b>	<b>Resistencia Comp. (MPa)</b>
			<b>Inicial</b>	<b>Final</b>				
<b>ARENA NO LAVADA</b>	1	19/10/2009	230.12	228.81	17/11/2009	1	47.8	19.12
	2	19/10/2009	230.91	232.86	17/11/2009	1	46.0	18.4
	3	19/10/2009	242..21	243.31	24/11/2009	2	46.5	18.6
	4	19/10/2009	223.98	225.05	24/11/2009	2	47.0	18.8
	5	19/10/2009	235.28	245.77	1/12/2009	3	47.8	19.12
	6	19/10/2009	221.18	235.32	1/12/2009	3	45.5	18.2
	7	19/10/2009	223.55	227.45	8/12/2009	4	48.3	19.32
	8	19/10/2009	224.62	233.06	8/12/2009	4	44.1	17.64
	9	19/10/2009	235.29	233.9	12/1/2010	9	40.25	16.1
<b>ARENA LAVADA</b>	19	21/10/2009	229.45	231.81	17/11/2009	1	46.8	18.72
	20	21/10/2009	234.32	236.58	17/11/2009	1	48.6	19.44
	21	21/10/2009	231.89	233.85	24/11/2009	2	43.9	17.56
	22	21/10/2009	221.97	223.46	24/11/2009	2	48.9	19.56
	23	21/10/2009	226.22	234.49	1/12/2009	3	48.6	19.44
	24	21/10/2009	238.42	247.12	1/12/2009	3	46.8	18.72
	25	21/10/2009	238.10	243.62	8/12/2009	4	45.6	18.24
	26	21/10/2009	229.33	235.39	8/12/2009	4	43.4	17.36
	27	21/10/2009	234.51	233.2	12/1/2010	9	44.5	17.8

**ANEXO I: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE  
50 mm 65 C**

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm 65 C</b>						
	<b>Nº Cilindro</b>	<b>Fecha de Fundición</b>	<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Edad Probeta</b>	<b>Carga Máx.</b>	<b>Resistencia</b>
				<b>(Días)</b>	<b>(KN)</b>	<b>Comp. (MPa)</b>
<b>ARENA NO LAVADA</b>	37	3/11/2009	10/11/2009	7	30.4	12.16
	38	3/11/2009	10/11/2009	7	34.6	13.84
	39	3/11/2009	17/11/2009	14	45.7	18.28
	40	3/11/2009	17/11/2009	14	37.5	15.0
	41	3/11/2009	17/11/2009	14	43.8	17.52
	42	3/11/2009	1/12/2009	28	44.9	17.96
	43	3/11/2009	1/12/2009	28	49.3	19.72
	44	3/11/2009	1/12/2009	28	45.2	18.08
	45	3/11/2009	22/1/2010	80	47.9	19.16
<b>ARENA LAVADA</b>	46	3/11/2009	10/11/2009	7	38.5	15.4
	47	3/11/2009	10/11/2009	7	33.7	13.48
	48	3/11/2009	17/11/2009	14	42.9	17.16
	49	3/11/2009	17/11/2009	14	48.3	19.32
	50	3/11/2009	17/11/2009	14	47.4	18.96
	51	3/11/2009	1/12/2009	28	54.2	21.68
	52	3/11/2009	1/12/2009	28	45.9	18.36
	53	3/11/2009	1/12/2009	28	50.7	20.28
	54	3/11/2009	22/1/2010	80	48.8	19.52

**ANEXO J: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm (65 C) A ALTAS TEMPERATURAS**

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO GEOPOLIMERICICO DE 50 mm (65 C) A ALTAS TEMPERATURAS</b>									
	Nº Cilindro	Fecha de Fundición	T (°C)	Peso (gr)		Fecha de Rotura	Edad Probeta (Días)	Carga Máx. (KN)	Resistencia Comp. (MPa)
				Inicial	Final				
<b>ARENA NO LAVADA</b>	55	4/11/2009	300	216.4	201.1	3/12/2009	28	49.5	19.8
	56	4/11/2009	300	220.6	211.3	3/12/2009	28	45.2	18.08
	57	4/11/2009	600	211.9	197.2	3/12/2009	28	33.4	13.36
	58	4/11/2009	600	215.1	199.8	3/12/2009	28	37.7	15.08
	59	4/11/2009	1000	210.6	181.7	3/12/2009	28	14.3	5.72
	60	4/11/2009	1000	230.8	209.6	3/12/2009	28	10.1	4.04
<b>ARENA LAVADA</b>	61	4/11/2009	300	199.3	186.1	3/12/2009	28	50.6	20.24
	62	4/11/2009	300	225.4	215.6	3/12/2009	28	44.4	17.76
	63	4/11/2009	600	216.5	201.8	3/12/2009	28	39.2	15.68
	64	4/11/2009	600	224.3	209.7	3/12/2009	28	36.5	14.6
	65	4/11/2009	1000	227.5	198.6	3/12/2009	28	13.7	5.48
	66	4/11/2009	1000	236.2	208.7	3/12/2009	28	16.9	6.76

**ANEXO K: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO DE 50 mm  
SOMETIDOS A MgSO4**

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO DE 50 mm SOMETIDOS A MgSO4</b>								
	<b>Nº Cilindro</b>	<b>Fecha de Fundición</b>	<b>Peso (gr)</b>		<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Edad Probeta (Semanas)</b>	<b>Carga Máx. (KN)</b>	<b>Resistencia Comp. (MPa)</b>
			<b>Inicial</b>	<b>Final</b>				
<b>ARENA NO LAVADA</b>	10	28/10/2009	242.32	244.23	25/11/2009	1	48.8	19.52
	11	28/10/2009	229.65	227.79	25/11/2009	1	48.4	19.36
	12	28/10/2009	222.41	220.29	2/12/2009	2	48.5	19.40
	13	28/10/2009	229.65	228.66	2/12/2009	2	44.5	17.8
	14	28/10/2009	229.85	227.90	9/12/2009	3	46.3	18.52
	15	28/10/2009	226.32	234.69	9/12/2009	3	45.7	18.28
	16	28/10/2009	238.54	237.89	16/12/2009	4	39.5	15.8
	17	28/10/2009	231.24	229.26	16/12/2009	4	48.7	19.48
	18	28/10/2009	230.86	228.83	20/1/2010	9	39.0	15.6
<b>ARENA LAVADA</b>	28	29/10/2009	239.26	238.77	26/11/2009	1	48.8	19.52
	29	29/10/2009	236.12	235.12	26/11/2009	1	49.2	19.68
	30	29/10/2009	213.54	212.63	3/12/2009	2	47.4	18.96
	31	29/10/2009	215.86	214.42	3/12/2009	2	49.6	19.84
	32	29/10/2009	218.57	219.32	10/12/2009	3	49.4	19.76
	33	29/10/2009	229.65	228.05	10/12/2009	3	41.6	16.64
	34	29/10/2009	240.21	239.08	17/12/2009	4	42.8	17.12
	35	29/10/2009	235.45	234.51	17/12/2009	4	47.4	18.96
	36	29/10/2009	232.5	231.62	21/1/2010	9	43.25	17.3

**ANEXO L: FORMATO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO DE 50 mm  
SOMETIDOS A ACIDO SULFURICO**

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO DE 50 mm SOMETIDOS A ACIDO SULFURICO</b>								
	<b>Nº Cilindro</b>	<b>Fecha de Fundición</b>	<b>Peso (gr)</b>		<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Edad Probeta (Semanas)</b>	<b>Carga Máx. (KN)</b>	<b>Resistencia Comp. (MPa)</b>
			<b>Inicial</b>	<b>Final</b>				
<b>ARENA NO LAVADA</b>	1	28/10/2009	231.32	230.98	25/11/2009	1	44.9	17.96
	2	28/10/2009	235.65	234.65	25/11/2009	1	52.3	20.92
	3	28/10/2009	221.32	219.56	2/12/2009	2	45.4	18.16
	4	28/10/2009	232.23	231.48	2/12/2009	2	48.8	19.52
	5	28/10/2009	212.35	211.98	9/12/2009	3	42.6	17.04
	6	28/10/2009	221.65	220.78	9/12/2009	3	48.8	19.52
	7	28/10/2009	231.45	230.65	16/12/2009	4	46.1	18.44
	8	28/10/2009	234.85	233.87	16/12/2009	4	40.1	19.24
	9	28/10/2009	228.59	227.1	20/1/2010	9	40.25	16.10
<b>ARENA LAVADA</b>	19	29/10/2009	234.65	233.32	26/11/2009	1	48.4	19.36
	20	29/10/2009	236.62	235.45	26/11/2009	1	47.6	19.04
	21	29/10/2009	221.32	220.36	3/12/2009	2	48.9	19.56
	22	29/10/2009	223.45	222.10	3/12/2009	2	47.9	19.16
	23	29/10/2009	224.98	222.99	10/12/2009	3	44.8	17.92
	24	29/10/2009	235.12	234.21	10/12/2009	3	46.6	18.64
	25	29/10/2009	232.12	231.09	17/12/2009	4	40.6	16.24
	26	29/10/2009	216.78	214.97	17/12/2009	4	48.2	19.28
	27	29/10/2009	215.97	214.8	21/1/2010	9	44.62	17.85