

**RESIDUOS GENERADOS POR LA AUTOCOMBUSTION DEL CARBON
COMO MATERIAS PRIMAS EN LA PREPARACION DE MATERIALES
GEOPOLIMERICOS PARA PROMOVER EL DESARROLLO DE PROCESOS
INDUSTRIALES AMBIENTALMENTE OPTIMOS**

**JAIRO GIOVANNI PEREA CONTRERAS
HUGO ANDRES RINCON GUARIN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANER
FACULTAD DE FISICOQUIMICA
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2010**

**RESIDUOS GENERADOS POR LA AUTOCOMBUSTION DEL CARBON
COMO MATERIAS PRIMAS EN LA PREPARACION DE MATERIALES
GEOPOLIMERICOS PARA PROMOVER EL DESARROLLO DE PROCESOS
INDUSTRIALES AMBIENTALMENTE OPTIMOS**

**JAIRO GIOVANNI PEREA CONTRERAS
HUGO ANDRES RINCON GUARIN**

Trabajo de grado como requisito para optar al título de: GEÓLOGOS

Director:

**CARLOS ALBERTO RÍOS REYES
Geólogo, PhD.**

Codirector:

**LUIS EDUARDO MORENO TORRES
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANER
FACULTAD DE FISICOQUIMICA
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA**

2010

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre VICTOR HUGO;

a mi hermosa madre MARIA AURORA;

a la memoria de mi abuelita ROSITA;

a mis hermanos LILI y DIEGO,

por el amor, el apoyo y la compañía;

a mi familia y amigos, GRACIAS.

Hugo.

A la memoria de mi madre CARMEN ELIZA CONTRERAS;

a mi novia LAURA MILENA PEÑARANDA CAMARGO.

por el amor, el apoyo y la compañía;

a mi familia y amigos, GRACIAS.

GIOVANNI

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Al doctor Carlos Alberto Rios, por darnos la oportunidad de desarrollar este proyecto.

Al Ingeniero Civil Luis Eduardo Moreno, por su apoyo en la realización de este proyecto.

A todos los docentes de la Escuela de Geología, por los conocimientos compartidos.

Al geólogo Orlando Ardila, por su aporte en este proyecto.

Al ingeniero Civil Miguel Ángel Camargo y al laboratorio de suelos CONSTRUSUELOS LTDA, por su colaboración en este proyecto.

A Luis Eduardo Garrido, por el apoyo prestado en su momento.

A todos los compañeros y amigos que estuvieron presentes durante el tiempo en la Universidad, en especial a Fabi, Gigi, Lala, Paflow, Gus, Johel, Nando y Xavi.

Gio y Hugo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	2
1.1. OBJETIVO GENERAL.	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	2
2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	3
2.1 EI CLINKER	3
2.1.1 Composición del clinker	6
2.1.2 Factores que controlan el desarrollo de clinker	7
2.2 GEOPOLIMEROS	8
2.2.1 Definición	8
2.2.2 Procesos de la geopolimerización	8
2.2.3 Aplicación de los Geopolímeros	9
2.2.4 Comportamiento de la geopolimerización	13
2.3 CEMENTO	15
2.3.1 Definición.	15
2.3.2 Producción del cemento portland.	15
2.3.3 El cemento portland tipo I (CPO)	16
2.3.4 Hidratación del cemento portland	16
2.4 IMPACTO AMBIENTAL	17
2.5 CONSECUENCIA DEL SILICATO SOLUBLE	19
2.6 LA RELACION DE LOS CATIONES (Na, K, Ca)	20
2.7 EL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE CURADO	21
3. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1MATERIALES	22
3.1.1. Materiales cementantes y agregados.	22
3.1.2 Adiciones Geopoliméricas	22
3.1.2.1 Clinker	22

3.1.2.2 Arena	23
3.1.2.3 Solución Activante	24
3.1.2.4 Agua.	25
3.1.2.5. Cemento (cemento portland tipo I) (CPO)	25
3.2 CARACTERIZACION DE MATERIALES	26
3.2.1 Análisis granulométrico de la arena (I.N.V.E 220)	26
3.2.2 Análisis mineralógico por difracción de rayos X.	27
3.2.3 Valor de azul de metileno en agregados finos I.N.V.E -235-07	28
3.2.4 Gravedad específica y absorción de agregados finos (I.N.V.E-222-07)	29
3.2.5 Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico norma técnica colombiana para el sector de la construcción (ICONTEC 226).	30
3.3 PREPARACION GEOPOLIMERICA	31
3.3.1 Mezclas, moldes y relleno	31
3.3.1.1 Mezcla Patrón (100% CPO)	34
3.3.1.2 Mezcla 1 (95% Clinker – 5% CPO)	34
3.3.1.3 Mezcla 2 (65% Clinker – 35% CPO)	35
3.3.1.4 Mezcla 3 (30% Clinker – 70% CPO)	36
3.3.1.5 Mezcla 4 (5% Clinker – 95% CPO)	36
3.4. CARACTERIZACION GEOPOLIMERICA	39
3.4.1 Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico (I.N.V. E – 323 – 07)	39
3.4.2 Ataque con ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	40
3.4.3 Ataque con sulfato de magnesio (MgSO ₄)	41
3.4.4 Resistencia a altas temperaturas (300°C, 600°C, 1000°C)	42
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1 RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS MATERIALES	43
4.1.1 Difracción de rayos X (DRX)	43
4.1.1.1 Clinker	43
4.1.1.2 Arena	44
4.1.2 Granulometría	45
4.1.2.1 Arena	46
4.1.3 Valor de azul de metileno en agregados finos (I.N.V.E -235-07)	47
4.1.3.1 Arena	47

4.1.4 Gravedad específica y absorción de agregados finos (I.N.V.E-222)	48
4.1.4.1 Clinker	48
4.1.4.2 Cemento portland ordinario tipo I (CPO)	48
4.1.4.3 Arena	49
4.1.5 Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico.	
Norma ICONTEC 226	50
4.1.5.1 Cemento	50
4.2 RESULTADOS Y ANALISIS GEOPOLIMERICOS	51
4.2.1 Resistencia a la Compresión	51
4.2.2 Resistencia al ataque con acido sulfúrico (H_2SO_4)	53
4.2.3 Resistencia al ataque con sulfato de magnesio ($MgSO_4$)	55
4.2.4 Resistencia a altas temperaturas (300°C, 600°C, 1000°C)	58
CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES	62
BIBLIOGRAFIA	63

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Muestra triturada de clinker	23
Figura 2. Muestra de arena natural.	24
Figura 3. Agitador de tamiz, para determinar la granulometría.	27
Figura 4. Difractómetro marca RIGAKU modelo D/MAX III B.	28
Figura 5. Determinación de la finura del cemento por el tamiz 200	30
Figura 6. Orden de los golpes para la fabricación de morteros.	32
Figura 7. Moldes para la fabricación de morteros.	33
Figura 8. Horno d8 serie 783 terrígeno	34
Figura 9. Horno binder para curado a 80°C	35
Figura 10. Probetas: a) Mezcla patrón 100% CPO; b) Mezcla 1: geopolímeros curado a temperatura ambiente; c) Mezcla 1: geopolímeros curados a 80°C; d) Mezcla 2: geopolímeros curado a temperatura ambiente; e) Mezcla 2: geopolímeros curados a 80°C; f) Mezcla 3: geopolímeros curado a temperatura ambiente; g) Mezcla 3: geopolímeros curados a 80°C; h) Mezcla 4: geopolímeros curado a temperatura ambiente; i) Mezcla 4: geopolímeros curado a 80°C	37
Figura 10a.	37
Figura 11. Máquina para la compresión de las probetas de morteros geopoliméricos.	40
Figura 12. Morteros sometidos a altas temperaturas en el Horno d8 serie 783 terrígeno.	42
Figura 13. Grafica del Espectro mineralógico del clinker	44
Figura 14. Grafica del espectro mineralógico de la arena.	45
Figura 15. Grafica del análisis granulométrico de la arena	47
Figura 16. Comportamiento promedios de la resistencia a la compresión, a) Curado a temperatura ambiente; b) Curado a temperatura 80°C	52
Figura 17. Comportamiento promedio de la resistencia al ataque con ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄), a) Curado a temperatura ambiente; b) curado a temperatura 80°C	54

Figura 18. Comportamiento promedio de la resistencia al ataque con sulfato de magnesio (MgSO_4), a) Curado a temperatura ambiente; b) curado a temperatura 80°C .

56

Figura 19. Comportamiento promedio de la resistencia a altas temperaturas, a) curado a temperatura ambiente; b) Curado a temperatura 80°C .

59

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Numero de tamiz y porcentaje estándar retenido permitido.	26
Tabla 2. Valor de azul de metileno y el comportamiento esperado.	29
Tabla 3. Minerales que presenta el clinker bajo la prueba del DRX	43
Tabla 4. Composición mineralógica de la arena natural de Pescadero	44
Tabla 5. Análisis granulométrico de la arena.	46
Tabla 6. Resistencias promedios a la compresión. a) Curado a temperatura ambiente; b) Curado a temperatura 80°C.	51
Tabla 7. Resistencias promedio al ataque con acido sulfúrico (H ₂ SO ₄), a) Curado a temperatura ambiente; b) Curado a temperatura 80°C.	53
Tabla 8. Resistencias promedio al ataque con sulfato de magnesio (MgSO ₄), a) Curado a temperatura ambiente; b) Curado a temperatura 80°C.	55
Tabla 9. Resistencias promedio a la alta temperatura, a) Curado a temperatura ambiente; b) Curado a temperatura 80°C.	58

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXOS. A. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 1 (CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE)	66
ANEXOS B. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 1 (CURADO A TEMPERATURA 80°C)	67
ANEXOS C. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 2 (CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE)	68
ANEXOS D. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 2 (CURADO A TEMPERATURA 80°C)	69
ANEXOS E. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 3 (CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE)	70
ANEXOS F. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 3 (CURADO A TEMPERATURA 80°C)	71
ANEXOS G. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 4 (CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE)	72
ANEXOS H. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 4 (CURADO A TEMPERATURA 80°C)	73
ANEXOS I. RESISTENCIA A LOS MORTEROS MUESTRA PATRON	74
ANEXOS J. VALOR DE AZUL DE METILENO EN AGREGADOS FINOS	75
ANEXOS K. ANÁLISIS GRANULOMETRICO A LA ARENA DE PESCADERO	76
ANEXOS L. PESO ESPECÍFICO Y ABSORCION DEL CLINKER	78

RESUMEN

TÍTULO: RESIDUOS GENERADOS POR LA AUTOCOMBUSTION DEL CARBON COMO MATERIAS PRIMAS EN LA PREPARACION DE MATERIALES GEOPOLIMERICOS PARA PROMOVER EL DESARROLLO DE PROCESOS INDUSTRIALES AMBIENTALMENTE OPTIMOS¹

AUTORES: JAIRO GIOVANNI PEREA CONTRERAS
HUGO ANDRES RINCON GUARIN

PALABRAS CLAVES: Geopolimerización, geopolímero, clinker natural, cemento portland tipo I (CPO), curado, fraguado, morteros y probetas.

Se realizó una investigación con tipos de morteros siguiendo la norma Normas Técnicas Colombianas (Norma NTC 4630. 1999.) a). Se sustituyeron morteros al 5, 35, 70 y 95% con un material proveniente de la auto combustión del carbón (clinker) y b) morteros 100 % de cemento portland ordinario tipo I (CPO). Todos los sistemas se caracterizaron mecánicamente a 7, 14 y 28 días. En este trabajo se utilizó difracción de rayos X (DRX), Análisis granulométrico por tamizado, valor de azul de metileno en agregados finos, análisis de finura, se hallaron los pesos específicos, aparentes, nominal y absorción máxima que condicionan al material para un buen comportamiento en el desarrollo del geopolímero. Se genera una geopolimerización de materiales y la solución activante se preparo disolviendo hidróxido de sodio al 98% en pellets, la cual se mezcló con solución de 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 $\text{H}_2\text{O} = 61.99\%$ en masa), Esta solución se preparo un día anterior al mezclado con el material de partida (clinker) y se fabricaron probetas de ensayo, las cuales fueron sometidas a pruebas tales como, resistencia a la compresión, ataque con acido sulfúrico (H_2SO_4), ataque con sulfato de magnesio (MgSO_4) y sometidas a altas temperaturas (300°C, 600 °C y 1000 °C), para evaluar y analizar su comportamiento, todas estas pruebas fueron tomadas de acuerdo a las normas ICONTEC e I.N.V.E

*Proyecto de Grado

*Facultad de fisicoquímica . Escuela de Geología . Director Carlos Alberto Ríos Reyes Geólogo M. Sc.

ABSTRACT

TÍTULO: RESIDUOS GENERADOS POR LA AUTOCOMBUSTION DEL CARBON COMO MATERIAS PRIMAS EN LA PREPARACION DE MATERIALES GEOPOLIMERICOS PARA PROMOVER EL DESARROLLO DE PROCESOS INDUSTRIALES AMBIENTALMENTE OPTIMOS²

AUTORES: JAIRO GIOVANNI PEREA CONTRERAS
HUGO ANDRES RINCON GUARIN

KEY WORDS: Geopolimerización, Geopolymers, natural clinker, portland cement type I (CPO), curing, mortars and cylinders.

An investigation was conducted at rates following the standard mortar Colombian Technical Standards (Standard NTC 4630. 1999), a). Mortars were replaced at 5, 35, 70 and 95% with a self material from coal combustion (clinker) and b) mortars 100% of Type I ordinary portland cement (OPC). All systems were characterized mechanically to 7, 14 and 28 days. In this work we used X-ray diffraction (XRD), Particle size analysis by sieving, methylene blue value in fine aggregates, fine analysis, specific weights were found, apparently, nominal and maximum absorption material condition for good performance in Geopolymers development. Geopolimerización is generated material and activating solution was prepared by dissolving sodium hydroxide pellets 98%, which was mixed with sodium silicate solution 42 with neutral molar ratio $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O} \approx 3.0$ ($\text{SiO}_2 = 28.74\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 9.27\%$ and $61.99\% \text{H}_2\text{O} = \text{mass}$), This solution was prepared one day prior to mixing with the starting material (clinker) and test specimens were manufactured, which were subjected to tests such as compressive strength, attack with sulfuric acid (H_2SO_4), assault with magnesium sulphate (MgSO_4) and subjected to high temperatures (300 °C, 600 °C and 1000 °C) to evaluate and analyze their behavior, All these tests were taken in agreement to the procedure ICONTEC and I.N.V.E

*Proyecto de Grado

* Facultad de fisicoquímica . Escuela de Geología . Director Carlos Alberto Ríos Reyes Geólogo M. Sc

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es un campo extenso, en el cual el cemento para la fabricación del concreto es el material más utilizado del mundo. Con el avance del tiempo y la tecnología se ha demostrado que el concreto es susceptible a una serie de fenómenos fisicoquímicos que pueden afectar en forma considerable su durabilidad. Sin embargo, con el avance de la tecnología hoy en día podemos utilizar materiales alternativos para mejorar la calidad del concreto.

El aumento de la población en nuestro planeta, trae como consecuencia el crecimiento de la infraestructura y el desarrollo socioeconómico, por tanto, la demanda de cemento Portland como material de construcción a nivel mundial aumenta significativamente. La fabricación de cemento Portland afecta al medio ambiente, que se ha convertido en un aspecto de preocupación mundial, debido a las emisiones globales de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera, la causa principal del calentamiento global. La industria cementera es una de las responsables en las emisiones de CO_2 , contribuyendo cerca al 60 % del calentamiento global (McCaffery, 2002). Varios estudios se han realizado en la búsqueda de componentes que puedan ser alternativos en la fabricación de materiales cementantes, con el fin de contribuir al mejoramiento del medio ambiente. Se han aportado ideas muy valiosas sobre diferentes materiales que pueden tener propiedades cementantes similares o hasta mejores, tales como puzolana, pumita, diatomita, cenizas volantes, etc. Respecto a la elaboración de geopolímeros a base de materiales cementantes, puede ser una alternativa para la aplicación en la industria cementera, ya que contribuye a reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera y es adecuada por su bajo costo.

el objetivo de este trabajo es caracterizar y determinar la relación existente entre las propiedades físicas y la composición química, con la finalidad de reducir el consumo de cemento Portland.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL.

Valorar los residuos generados por la autocombustión del carbón en la preparación de materiales geopoliméricos con propiedades aplicables para la industria cementera y en el mejoramiento de la calidad ambiental.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Evaluar el uso del “clinker” en la preparación de geopolímeros.
- Analizar, evaluar y comparar las propiedades físico-mecánicas del material obtenido, con las propiedades Físico-Mecánicas del cemento tradicional.
- Disminuir la contaminación generada por la fabricación de cemento tradicional bajo la utilización de geopolímeros.

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 EI CLINKER

El clinker es un subproducto fundido o parcialmente fundido de la combustión de carbón o de escoria vitrificada. Las distintas litologías y diferentes grados de fusión relacionados con la quema de carbón hacen que sea difícil de utilizar un término para toda la secuencia. Geólogos de carbón se refieren a las rocas al horno asociadas con yacimientos como de carbón quemado naturalmente, o también como clinker natural.

Los depósitos de clinker naturales son resultado de la combustión de carbón a menudo se atribuye a las praderas de incendios o rayos. La combustión espontánea es la causa más significativa de la quema de carbón y es una ocurrencia común en las minas de carbón sub-bituminoso y lignito. los Carbones de bajo rango, debido a su alto contenido de humedad, tienen una mayor tendencia a la liberar calor cuando es expuesta en un afloramiento. El secado por la exposición de aire promueve la pérdida de humedad interna en los afloramientos de carbón, haciendo que el carbón pierda totalmente la humedad, la creación de área de superficie mayor por parte del carbón natural. El carbón se oxida y acelera la autocalfacción hasta ser latente la combustión, Algunos investigadores creen que la presencia de la dispersión de la pirita en la oxidación del carbón aumenta significativamente el potencial de la combustión espontánea. El lignito y carbón sub-bituminoso puede comenzar su autocalentamiento en 300°C y en carbones bituminosos a 600°C. Los depósitos naturales de clinker a menudo se encuentran en los bordes de los sistemas de drenaje, donde por el corte de los arroyos expuestos y los yacimientos de carbón, ha aumentado la posibilidad de combustión espontánea. (*Hoffman, Gretchen K. 2006*)

Las investigaciones de clinker natural en Wyoming y Dakota del Norte han estudiado el origen de estos depósitos y su uso potencial como indicadores de

los recursos de carbón. Los colores rojos, morado o negro, causado por oxidación de hierro durante el calentamiento, hacen que los depósitos de clinker natural sean caracterizados. Shale, lodo y sedimento más cercanos a la combustión de carbón son alterados a un ladrillo-como el material y la piedra arenisca se ha endurecido por el calor. Estas rocas son a menudo más resistentes a la erosión de las secuencias sin el deterioro característico, dando lugar a importantes características topográficas. Se trata de la dureza de este material que hace que el clinker natural sea útil en algunas aplicaciones de los minerales para las industrias disminuyendo el impacto ambiental por parte de las mismas. (*Hoffman, Gretchen K. 2006*).

Gran parte de la cuenca de la guajira al noroeste de Colombia tiene afloramientos de pizarra suave, cieno, carbón y piedra arenisca. Agregados comunes como la piedra caliza, arena y grava no están fácilmente disponibles. El clinker natural se utiliza como base de carreteras en algunas carreteras del norte de Colombia donde no hay otro material adecuado y los depósitos de clinker están cerca. Algunas minas de carbón en la guajira utilizan el clinker natural para las carreteras en la misma mina, con fines de recuperación, y para estabilizar las zonas. Peabody's Arizona Black Mesa mines, ha experimentado con clinker natural como un agregado para el hormigón, pero no encontró que el producto tuviera la fuerza necesaria para estructuras permanentes. (*Hoffman, Gretchen K. 2006*)

Geólogos del Carbón se refieren como el clinker a rocas sedimentarias de alto horno y se funde rocas asociadas a la combustión espontánea del carbón del subsuelo formadas durante el pasado geológico reciente (desde la época del Plioceno temprano), características geológicas que son comunes que han sido reportados en las diferentes áreas en todo el mundo. En algunos casos, estas rocas han sido el principal factor que contribuye a la formación de interpretación de las características topográficas y las geoformas en la cuenca carbonífera (Coates y Heffern, 2000). Kuchta et al. (1980) considera que el rango de carbón y de las estructuras geológicas son las más importantes características que facilitan el auto natural calentamiento del carbón. Sin embargo, además de estos factores, el flujo de aire, la temperatura y el

contenido de minerales de sulfuro, también desempeñan un papel importante en el inicio de la combustión (Kim, 1977; Lyman y Volkmer, 2001). Sevenster (1961) determinó que la cantidad de calor producido durante la de oxidación dependerá principalmente de la interacción entre el oxígeno del carbón. Según Timko y Derick (1995), si el calor de oxidación no es disipado o eliminado del medio ambiente, el carbón continuar el calentamiento, poco a poco, dando lugar a la combustión espontánea. El reacciones químicas que ocurren durante la lenta oxidación del carbón que es muy complejo (Swan y Evans, 1979), sin embargo, los carbones de baja categoría, especialmente bituminoso o un sub-bituminoso característico, fácilmente puede ser someterse a la autocombustion (Litton y Page, 1994). Lyman y Volkmer (2001) indicó que el calentamiento espontáneo se produce debido a la baja temperatura en la oxidación, combinación con la adsorción de humedad, dependiendo de si el carbón será parcial o totalmente secado. Estudios paleomagnéticos en rocas afectada térmicamente por la combustión de carbón indican que pueden ser de alta fidelidad geomagnética grabadores de campo (Jones et al., 1984; Krsová et al., 1989). De Boer et al. (2001) las propiedades magnéticas de las rocas sedimentarias informa térmicamente metamorfosis por espontaneidad en la autocombustión, que es de gran importancia para delinear la extensión en superficie y la profundidad de la penetración de los incendios de carbón extinto. Balachandran (1996) realizaron sísmica. Los resultados apoyan el concepto de que las zonas de fractura pueden ser identificadas por la fuerza de las ondas de corte convertido, que puede ser un medio útil y económico para detectar yacimientos fracturados. Algunos estudios (Heffern et al., 1983, 2007, Jones et al., 1984, Coates y Naeser, 1984; Reiners y Heffern, 2002) utilizando modernas técnicas de datación determinó la edad de las rocas alteradas térmicamente asociadas con los incendios antiguos que sucedieron en repetidas ocasiones de el inicio del Plioceno ($4,0 \pm 0,7$ Ma) en el pasado geológico reciente ($0,5 \pm 0,3$ M.A.). Jones et al. (1984).

En Colombia, la investigación sobre la cuenca carbonífera del Cerrejón incluye varios estudios geológicos basados principalmente en estructurales y aspectos estratigráficos. Candela y Quintero (2004) llevó a cabo la primera cartografía geológica detallada de clinker que afloran en la Cerrejón, la mina de carbón,

que además incluye la elaboración de modelos y control estructural en profundidad. Sin embargo, los procesos de espontánea de la combustión de carbón y la generación de clinker apenas han sido estudiados. Álvarez y Gómez (1986) realizaron un estudio patológico de los productos obtenidos como consecuencia del intenso calor al que las rocas adyacentes de acogida fueron expuestas durante la combustión de carbón las costuras, que era lo suficientemente alta para la fusión parcial de las cenizas y la producción por lavas de composición basáltica.

2.1.1 Composición del clinker

Las fases minerales en el clínker dependen de muchos factores físicos y variables químicas, incluyendo la original composición de los sedimentos a granel, la temperatura, el grado de fusión, y el grado de oxidación o reducción que alcanza durante la grabación (Cosca et al., 1989). Recientemente, Sandoval (2009) llevó a cabo un estudio sobre la mineralogía y química composición. X-datos de difracción de rayos reveló reflexiones agudas con alta intensidad de cuarzo (en diferentes polimorfos cristalinos), así como reflexiones de ancho, con baja intensidad que refleja la presencia de las huellas de las fases minerales diferentes, como cordierita, cristobalita, cuarzo, hematita, caolinita, montmorillonita, mullita, y tridimita. Sin embargo, el clinker es un geomaterial con una mineralogía compleja, con solapamiento de los picos correspondientes a las fases minerales diferentes. La composición elemental de clinker a partir del cuantitativo análisis de los espectros de EDXS se expresan como porcentajes de peso muestra las variaciones de peso de hasta el 15% entre sus principales óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O y CaO), lo que probablemente refleja la heterogeneidad local relacionados con pequeños cambios en la roca sedimentaria original (Ríos y Williams, 2008). De clinker se compone principalmente de varios de los polimorfos SiO_2 (22,8-34,4%). Sin embargo, este carbón-producto contiene otras fases cristalinas como mullita (14,2%), montmorillonita (4%), hematita (1.7-2.4%) y trazas de rutilo, ilmenita y anatasa. Por tanto, los colores del clinker pueden explicarse por sus concentraciones mineralógicas. Por ejemplo, el aumento de la concentración de minerales opacos (magnetita), de brillo metálico definir las rayas negro,

mientras que las zonas de color rojizo se asocian a una mayor oxidación y el alto contenido de hematita.

2.1.2 Factores que controlan el desarrollo de clinker

El desarrollo de clinker es controlado por la presencia y abundancia de oxígeno, ya que el calor generado y el aumento de la temperatura dependerá de su interacción con el carbón (Sevenster, 1961). Clinker alcanza su máxima extensión en la superficie o cerca de ella debido a la abundancia de oxígeno y la combustión espontánea simultánea de varias capas de carbón, cada vez más delgada en profundidad acompañado de la disminución de suministro de oxígeno. En efecto, parcialmente fundida y con frecuencia altamente vesicular rocas que parecen ser industrial o metalúrgica hornos de residuos se encuentra en la superficie, pero nunca con la profundidad.

Una vez la inflamación se produce en un punto específico de la veta de carbón cerca de la superficie, el fuego se mueve en direcciones opuestas desde el punto de partida, el avance sin dificultad hasta la veta de carbón se puede encontrar un obstáculo, como fallas o adelgazamiento de la veta de carbón, lo que impide su continuidad o aislados desde las zonas de oxidación. Combustión espontánea sólo puede avanzar en profundidad si el agua es evacuada del sistema y las fracturas contienen gases de la atmósfera en lugar de agua. En una secuencia del carbonífero donde el nivel freático cae, el carbón sufre una reacción endotérmica mientras que la humedad superficial puede perder en las fracturas.

Sin embargo, sufre el efecto contrario cuando el agua circula a lo largo de la veta de carbón, por ejemplo, cuando una recarga del acuífero de la superficie se produce. En cualquier caso, la combustión espontánea puede avanzar sólo hasta el nivel mínimo alcanzado por el nivel freático. Combustión espontánea es un proceso auto-sostenido desde una vez a varios metros de espesor de carbón es consumido por este proceso, su volumen se redujo a unos pocos centímetros. Esto hace que la instalación de roca se genere para cerrar las

grietas de generación, que se propagan hacia la superficie actuando como una chimenea que se promueve el intercambio de gases y calor.

2.2 GEOPOLIMEROS

2.2.1 Definición

Geopolímero es el nombre dado a un grupo de álcali activo alumino-silicatos aglutinantes que se formara por la mezcla rica en sílice y alúmina materiales ricos con una solución de álcalis o sales alcalinas. La mezcla resultante de los geles y los compuestos cristalinos finalmente endurecerse y convertirse en una fuerte nueva la matriz. Esto está en contraste con los productos de Cemento Portland, que utilizan un material puzolánico, la reacción entre la sílice y carbonato de calcio para formar silicatos de calcio como la unión de la matriz.

2.2.2 Procesos de la geopolimerización

El Centro de Procesamiento Sostenible de los Recursos apunta a crear nuevos métodos para producir los minerales y los metales de una manera que beneficie a la comunidad, el medio ambiente y la industria. Tiene una visión sostenible de procesamiento de minerales y metales, la producción mundial de material de satisfacer las necesidades de la sociedad con el impacto ecológico reducido significativamente. Para lograr esto, tiene como objetivo encontrar soluciones tecnológicas para la progresiva eliminación de los residuos y emisiones en el ciclo de los materiales, al tiempo que mejora el rendimiento del negocio y las expectativas de la comunidad reunión.

La geopolimerización surge como un proceso viable para transformar estos residuos en nuevos productos y valorizarlos como materias primas. Los geopolímeros tienen la fórmula empírica general: $M_n (-(Si-O)_2)_z - Al-O)_n \cdot n \cdot H_2O$, donde M es un catión alcalino (K, Na, Li o Cs), z vale comúnmente 1, 2 ó 3 y n es el grado de polimerización.

Los geopolímeros se forman por la co – polimerización del aluminio y especies de silicato que proceden de la disolución de la alúmina y el silicio presentes en la constitución química de los materiales de origen, a valores altos de pH, en presencia de silicatos solubles alcalinos. La geopolimerización es por supuesto dependiente de la composición mineralógica, de la relación sílice/alúmina, de la concentración de álcalis, de la morfología del reactivo y de la superficie específica. Los áridos ligeros con base en la arcilla contienen ya una proporción rica inicial de SiO₂ y Al₂O₃.

La geopolimerización es una manera viable para procesar y agregar valor a los residuos industriales de aluminio-silicato dando lugar a materiales con elevadas resistencias mecánicas, alta inercia química y que permiten encapsular otros residuos, incluso peligrosos.

Los geopolímeros se han producido con fórmulas diferentes y se han caracterizado sus propiedades mecánicas, composición y microestructura, para dar lugar a una composición interesante con propiedades aislantes. Se ha llevado a cabo además un análisis preliminar sobre la formación de sales que tiene lugar en este tipo de geopolímeros como una desventaja de los mismos.

Los residuos de la producción de áridos ligeros se transforman en geopolímeros mediante la activación alcalina y luego se caracterizan desde el punto de vista de sus propiedades mecánicas, composición y microestructura. El objetivo es construir materiales en la forma de paneles para mejorar el aislamiento térmico y Acústico. Otras aplicaciones que hagan uso de su elevada resistencia química pueden constituir también un enfoque alternativo.

2.2.3 Aplicación de los Geopolímeros

Hay muchas aplicaciones potenciales, obviamente para este trabajo se buscan las propiedades cementantes tales como la resistencia inicial alta, baja permeabilidad, resistencia a los ácidos y rápidos tiempos de fraguado, junto a

las materias primas de bajo costo. Las posibles aplicaciones de este producto incluyen:

La encapsulación y la inmovilización de los residuos peligrosos o tóxicos, como los residuos radiactivos, amianto y metales pesados. La fabricación de geopolímeros con materiales de desecho deben proporcionar los medios económicos de encapsulación para una variedad de aplicaciones en base de cemento Portland productos que podrían ser demasiado caros o no lo suficientemente duraderos.

Las barreras de baja permeabilidad o forros para los sitios de relleno sanitarios. Los Geopolímeros son especialmente útiles en caso de fuga mínima de contaminantes en el sistema de aguas subterráneas.

La construcción de represas como la estabilización de las presas, especialmente en zonas de alta humedad. El tratamiento in situ de residuos para aumentar su potencial de solidificación, puede permitir que la minería se desarrolle en las zonas ambientalmente sensibles, donde la amenaza son físicamente inestables y los residuos lixiviados de metales tóxicos es prohibitivo para el desarrollo. Los Geopolímero también pueden ser utilizados para la nivelación de las escombreras existentes en la seguridad del medio ambiente existentes (por ejemplo, grandes cantidades de polvo fugitivo que contienen sílice respirable).

La construcción de las pilas de lixiviación geopoliméricas sería una alternativa rentable a las prácticas actuales, no permeables y no reactivos en superficie para la recolección de lixiviado.

Construcción de materiales con baja permeabilidad, plantas resistentes al ácido y recubrimiento en las paredes para el almacenamiento y cegadoras de compuestos químicos (por ejemplo, las tiendas de petróleo, bunding depósito de gasóleo, instalaciones químicas).

Aplicaciones para la minería a cielo abierto y subterráneo para estabilización de las paredes (es decir una alternativa a la aspersion sobre las aplicaciones concretas). Este tipo de geopolímero se utiliza para las propiedades de fraguado rápido, de alta resistencia inicial, baja permeabilidad y de resistencia al ácido, que son particularmente pertinentes para las minas de sulfuros masivos en ácido de las minas de drenaje puede ser un problema importante..

Mucho se ha hecho para crear una mejor comprensión de geopolimerización y de sus aplicaciones potenciales. Tratar de utilizar materiales de desecho para proporcionar materiales como soluciones de gestión de residuos y los problemas de remediación ambiental. Sin embargo, hay ciertos factores que obstaculizan el desarrollo e incluso la aplicación industrial. aunque algunos de ellos constituyen una falta de conocimientos fundamentales, las demás involucran la captura de costumbre por la que las nuevas tecnologías son recibidos, tanto por los investigadores como así como por la industria .

Desde la aplicación y el punto de vista de la ingeniería, la investigación sobre la utilización de los residuos materiales, en particular los de la industria minera, requiere una atención urgente. Un sistema de clasificación de desperdicios basado en la idoneidad de formas diferentes de residuos como una participación directa en una reacción geopolimérica.

A principios los geopolímeros fueron sintetizados 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. A Principios materiales geopoliméricos son establecidos 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 1999) 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 aluminosilicatos puede ser usado para la elaboración 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 y Kovalchuk, 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 (Fernández-Jiménez, 2005; 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:

La reacción álcali-agregado (AAR). Es bien conocida por ser un problema importante, y usualmente causa deterioro a largo plazo en la resistencia del concreto (Mindess y Young, 1981). 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 AAR (Davidovits, 1999; 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.

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.

2.2.4 Comportamiento de la geopolimerización

En esencia, los geopolímeros son un grupo de materiales como el cemento que se forman por reacción rica en sílice y alúminosilicatos ricos con una solución de álcalis o sales alcalinas resultando en una mezcla de gel y compuestos cristalinos que eventualmente se endurecen en una fuerte y nuevo compuesto.

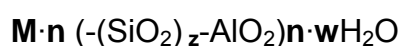
Idealmente, los geopolímeros constan de alúmina y sílice tetraedros interconectados por rotación, comparten todos los átomos de oxígeno. Una estructura polimérica de Al-O-Si, formando los principales elementos constitutivos de la estructura de los geopolimeros

El mecanismo exacto por el cual se produce el endurecimiento de los geopolímeros todavía no es plenamente comprendido y la mayoría de las propuestas en este sentido consisten en una disolución, el transporte o la orientación, así como de un precipitación (condensación) .De acuerdo con Van Jaarsveld 1995. Parece que una sal de metal alcalino y / o hidróxido es necesario para la disolución y producción de sílice y alúmina, así como la

catálisis de la condensación (precipitación) reacción. Se espera que la concentración de álcalis, así como la partícula de tamaño y la estructura cristalina de sílice y alúmina tendrán fuertes con una influencia importante en la formación de gel posible a través de las especies disueltas.

En lo que se refiere a la etapa de disolución, parece que (como es el caso de la mayoría de las químicas reacciones) el grano más fino de la sílice y alúmina de las fuentes, son más fácil su disolución y finalmente la formación del gel . La estructura cristalina de los materiales de partida también se cree que desempeñan un papel importante en la determinación de los productos de la disolución y por lo tanto la orientación de las especies individuales justo antes de la solidificación.

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 SiO_4 y AlO_4 unidos por átomos compartidos de oxígeno. Dentro de las cavidades de la red, deben estar presentes iones positivos (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ , H_3O^+) para contrarrestar las cargas negativas del 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).

2.3 CEMENTO

2.3.1 Definición.

En el sentido general de la palabra, “el cemento puede definirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto”. Esta definición comprende una gran variedad de materiales cementantes (Neville, 1999). Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto se denominan cementos hidráulicos. El cemento hidráulico es un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua, ya sea sólo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conservará su resistencia y estabilidad (NMX-C-414-ONNCCE). Los cementos hidráulicos están compuestos principalmente por silicatos y aluminatos de calcio y pueden clasificarse, en general, como cementos naturales, cementos Portland y cementos de alta alúmina (Neville, 1999).

2.3.2 Producción del cemento portland.

El cemento Portland está definido por la norma ASTM C 150 como un conglomerante hidráulico producido al pulverizar el clinker que consiste esencialmente de silicatos de calcio, conjuntamente con una o más formas de sulfato de calcio. El clinker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y es producido por una mezcla de materiales sintetizados a aproximadamente 1450° C. Los principales óxidos presentes en la materia prima son CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ (Mehta, 1998). Los materiales usados para la producción del cemento Portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro. Durante la fabricación, se hace análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizarse una calidad alta y uniforme del cemento (Kosmatka, 2004).

2.3.3 El cemento portland tipo I (CPO)

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

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

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

2.3.4 Hidratación del cemento portland

En el desarrollo químico, la hidratación 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.

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).

2.4 IMPACTO AMBIENTAL

La industria del cemento tiene un impacto ambiental negativo importante para la salud, en función de su localización con relación a centros poblados. La industria del cemento incluye las instalaciones con hornos que emplean el proceso húmedo o seco para producir cemento de piedra Caliza, y las que emplean agregado liviano para producirlo a partir de esquisto o pizarra. Se utilizan hornos giratorios que elevan los materiales a temperaturas de 1400C°. Las materias primas principales son piedra caliza, arena de sílice, arcilla, esquisto, marga y óxidos de tiza. Se agrega sílice, aluminio y hierro en forma de arena, arcilla, bauxita, esquisto, mineral de hierro y escoria de alto horno. Se introduce yeso durante la fase final del proceso. La tecnología de hornos de cemento se emplea en todo el mundo. Usualmente, las plantas de cemento se ubican cerca de las canteras de piedra caliza a fin de reducir los costos de transporte de materia prima.

Los impactos ambientales negativos de las operaciones de cemento ocurren en las siguientes áreas del proceso: manejo y almacenamiento de los materiales (partículas), molienda (partículas), y emisiones durante el enfriamiento del horno y la escoria (partículas o "polvo del horno", gases de combustión que contienen monóxido (CO) y dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos, aldehídos, cetonas, y óxidos de azufre y nitrógeno). Los contaminantes hídricos se encuentran en los derrames del material de alimentación del horno (alto pH,

sólidos suspendidos, sólidos disueltos, principalmente potasio y sulfato), y el agua de enfriamiento del proceso (calor residual). El escurrimiento y el líquido lixiviado de las áreas de almacenamiento de los materiales y de eliminación de los desechos puede ser una fuente de contaminantes para las aguas superficiales y freáticas. El polvo, especialmente la sílice libre, constituye un riesgo importante para la salud de los empleados de la planta cuya exposición provoca la silicosis. Algunos de los impactos mencionados pueden ser evitados completamente, o atenuados más exitosamente, si se escoge el sitio de la planta con cuidado.

La industria de la construcción es la que consume más materias primas a nivel mundial, siendo su contribución al impacto medioambiental, especialmente al efecto invernadero, ciertamente significativa.

Por este motivo, existe un interés creciente en el desarrollo de materiales y tecnologías que permitan reducir este impacto y minimizar dicho impacto en todo tipo de procesos y productos y, en particular en el sector del cemento y del hormigón, de forma que la tendencia dominante es la de avanzar hacia un desarrollo verdaderamente sostenible.

La sustitución del cemento por cenizas volantes u otros residuos industriales, como escorias o humo de sílice, es un excelente ejemplo de cómo mejorar la conservación de los recursos y reducir la contaminación.

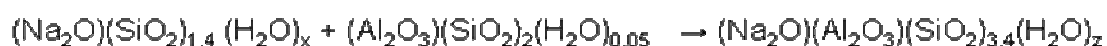
Por otra parte, el empleo de residuos como áridos en el hormigón procedentes de demoliciones, de escorias, de neumáticos u otros, contribuye a la reducción del enorme consumo de piedra natural necesario en las obras que, actualmente, se puede estimar en el orden de los 8.000 millones de toneladas anuales en todo el mundo.

Afortunadamente, las recientes innovaciones tecnológicas, además de hacer viable el uso de materiales alternativos, también ayudan a aumentar la vida útil de las estructuras y a reducir el impacto de su mantenimiento.

2.5 CONSECUENCIA DEL SILICATO SOLUBLE

El proceso de geopolimerización es en gran medida afectado 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. (1996a, b; 1997). En lugar de geopolímero, LTIG (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 estudios, 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. LTIG es sintetizado mediante la activación de la caolinita calcinada (metacaolinita) en Na-silicato con soluciones $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ con relación mola de 1 a 2,15. Rahier et al. (1996a) 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 LTIG. El efecto de la concentración de álcalis (H_2O/M_2O) 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_2/M_2O).

Fernández, Jiménez y Palomo (2002) utilizaron concentraciones más altas de silicato ($SiO_2/Na_2O = 1,0-6,0$) 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.

2.6 LA RELACION DE LOS CATIONES (Na, K, Ca)

Se considera 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, 1989). 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.

2.7 EL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE CURADO

Se observa 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; Katz, 1998). 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.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

3.1.1. Materiales cementantes y agregados.

En el desarrollo de la elaboración de las mezclas experimentales requeridas en las pruebas de laboratorio se utilizaron los siguientes materiales: Cemento Portland Ordinario (CPO 40) de la marca Holcim Apasco*. O cemento tipo uno. Arena (según la norma ASTM C-778 Specification for Standard Sand), con La solución activante que se preparará disolviendo hidróxido de sodio al 98% en pellets suministrado por Sigma Aldrich en agua destilada en concentración 8M, la cual será mezclada con solución de 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 es recomendado). Esta solución se preparará un día antes de mezclar con el material de partida. También se utilizara el clinker (residuo térmico del carbón organico).

3.1.2 Adiciones Geopoliméricas

3.1.2.1 Clinker

Colombia cuenta con una importante zona carbonífera, en donde es posible obtener residuos mineros,

Figura 1. Muestra triturada de Ckinker



3.1.2.2 Arena

Los áridos finos susceptibles de ser utilizados en la fabricación de hormigones de alta resistencia son, casi con carácter exclusivo, los obtenidos por procedimientos naturales a partir de sus rocas de origen. Con dichos procedimientos las partículas de agregado fino presentan formas regulares, las cuales, como en el caso de las gravas, favorecen la unión con la pasta de cemento. Los granos de las arenas obtenidas por procedimientos de machaqueo presentan formas excesivamente angulosas que los hacen pocos recomendables en la fabricación de H.A.R. debido, fundamentalmente, a la excesiva demanda de agua que su uso implica para conseguir un hormigón de la trabajabilidad mínima necesaria. En ocasiones, puede adoptarse una solución intermedia, consiste en utilizar una mezcla compuesta mayoritariamente por arena natural complementada en sus fracciones de tamaño inferior por arena de machaqueo. En cualquier caso, como en la mayoría de las cuestiones relacionadas con los H.A.R., la decisión más conveniente queda supeditada a ensayos específicos realizados para establecer la mejor solución para cada caso concreto. No obstante, y aun cuando hasta la fecha no están definitivamente establecidos los valores óptimos de las características de este constituyente, parece evidenciarse que arenas rodadas y limpias en las cuales esta arena cumplía las especificaciones granulométricas establecidas en la norma 226 ICONTEC. Un aspecto de la mayor importancia en relación con el uso de este constituyente

es el que se refiere a la forma de efectuar los acopios del mismo. La variación entre la humedad de dos fracciones de arena situadas en las zonas superior e inferior de un acopio tradicional es en ocasiones superior al 5%.

Es un agregado fino de origen natural, que por sus características de forma favorece la unión con el cemento y a su vez con los agregados gruesos. La arena tiene un diámetro inferior a 4.76 mm y no menor de 0.074 mm,, cuando la granulometría de las arenas es excesivamente fina, es decir, con módulos de finura menores a 3.00 exige una mayor cantidad de cemento y agua, y como consecuencia se obtiene un hormigón de consistencia “pegajosa” inadecuada para hormigones de alta resistencia.

Figura 2. Muestra de arena natural.



3.1.2.3 Solución Activante

Para la activación química del clinker, se utilizó silicato de sodio (Na_2SiO_3) grado industrial con una relación en peso $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ de 2.0, a lo que se conoce como el módulo del silicato de sodio y también se utilizó hidróxido de sodio (NaOH) o 'hidróxido sódico, también conocido como soda cáustica. Esta solución activante o también gel, es la que me genera una reacción de hidratación entre el cemento y el clinker generándome la geopolimerización con sus propiedades silíceas.

La utilización del clinker como reemplazo total del CPO implica su activación química con un agente alcalino tal como NaOH, Na₂SiO₃, Ca(OH)₂, Na₂CO₃, Na₂SO₄ o mezcla de ellos. El clinker al igual que el CPO, tiene propiedades hidráulicas, es decir, al entrar en contacto con el agua ocurren reacciones de hidratación que forman nuevas fases con propiedades cementantes. Sin embargo, la velocidad de reacción del clinker con el agua es muy lenta, debido a la formación de una capa ácida rica en sílice que impide la penetración del agua hacia el interior de la estructura (Moranville, 1998). Durante la activación química del clinker, la adición de los iones OH incrementa la velocidad de reacción facilitando el rompimiento de la estructura vítrea de la escoria y precipitando los productos cementosos (Wang y Scrivener, 1995).

3.1.2.4 Agua.

Debido a la menor cantidad de agua utilizada en la fabricación de los hormigones de alta resistencia, en relación con la que suele ser habitual en los hormigones convencionales, la adopción de los criterios de idoneidad de agua admitidos tradicionalmente para estos últimos supone la incorporación de un menor aporte de sustancias nocivas en los H.A.R. Tampoco es admisible para los hormigones de alta resistencia la adopción del criterio recogido por alguna normativa extranjera, por ejemplo ASTM C-94-92 que acepta el empleo de aquellas aguas que incorporadas a un hormigón determinado permiten la obtención de resistencia mínimas iguales al 90% de la patrón. Aun cuando podría argumentarse que la validez del procedimiento ASTM dependerá del valor de resistencia obtenido, la obtención del mínimo exigible llevaría implícito un costo adicional del producto final difícilmente aceptable.10

3.1.2.5. Cemento (cemento portland tipo I) (CPO)

Los resultados de distintas investigaciones al respecto demuestran que, además de la resistencia existen otros factores no menos importantes como la finura del molido del materia o su composición mineralógica, estas características que se manifiestan en los cementos disponibles en la actualidad

nos obligan a tener cuidado al escoger la marca o tipo de cemento comercial. El desarrollo de resistencia de la pasta de cemento es función, principalmente, de su contenido en SC3, (silicato tricálcico), SC2 (silicato bicálcico) y AC3 (aluminato ricálcico). El SC3, contribuye decisivamente a la resistencia en las primeras edades y a la resistencia final. El SC2, tiene menor incidencia al principio, pero su importancia es primordial después. Por el contrario, el contenido de AC3 tiene una particular influencia en las primeras edades. La influencia del resto de los componentes del cemento en los procesos de resistencia y calor de hidratación del hormigón es menor que la de los citados; no obstante, resulta necesario destacar que un elevado contenido del álcalis (Na_2O y K_2O) incrementa la resistencia a edades tempranas en detrimento de la final.

3.2 CARACTERIZACION DE MATERIALES

3.2.1 Análisis granulométrico de la arena (I.N.V.E 220)

La arena que se use para los cubos debe ser natural, de sílice, normalizada para ensayos y gradada como se indica en la tabla 1.

Tabla 1. Numero de tamiz y porcentaje estándar retenido permitido.

TAMIZ ICONTEC	% DE ACUMULADO RETENIDO
150µm(#100)	98±2
300µm(#50)	75±5
600µm(#30)	2±2
1,18MM(#16)	0

Figura 3. Agitador de tamiz, para determinar la granulometría.



Para probar la gradación de la arena debe hacerse un tamizado de prueba con cada uno de los tamices mencionados en el cuadro anterior, se toma el contenido de un saco lleno de arena normalizada de arena para ensayo de 45Kg, se extiende en una superficie plana, se mezcla cuidadosamente y se separa por cuarteo unos 700gr de la muestra obtenida; por cuarteo se toma unos 100 gr y se empieza las operaciones de tamizado con cada uno de los tamices de acuerdo con el procedimiento especificado en la norma ICONTEC 226.

3.2.2 Análisis mineralógico por difracción de rayos X.

Se realizó un análisis mineralógico por Difracción de Rayos-X (DRX) para determinar las diferentes fases minerales cristalinas y amorfas de los diferentes materiales. Este método se basa en la interacción entre los rayos X y la materia cristalina que produce la difracción. Así pues, cuando la radiación incide sobre una estructura cristalina se produce la difracción del haz cuando se cumple la ley de Bragg ($n\lambda=2d \text{ sen } \theta$), y manteniendo la λ de la radiación incidente y n constantes se pueden determinar variaciones en el espacio entre planos reticulares, o bien en el ángulo de difracción. Las muestras se tomaron del material previamente preparado y se colocaron en los portamuestras. La

muestra es irradiada con rayos X de una determinada longitud de onda y la muestra y detector girarán simultáneamente cambiando el ángulo, así, a medida que los diferentes planos se ajustan a la ley de Bragg se produce la difracción. Los análisis fueron realizados en un equipo marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB (figura 4) utilizando la técnica de polvos obtenidos como se mencionó anteriormente.

Figura 4. Difractómetro marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB.



3.2.3 Valor de azul de metileno en agregados finos I.N.V.E -235-07

Este procedimiento me indica la cantidad de material potencialmente dañino (incluyendo arcilla y materia orgánica) presente en la fracción fina de un agregado mediante la determinación de 1 valor de azul de metileno.

La solución de azul de metileno es titulada en pequeños incrementos en un recipiente que contiene agua destilada y la muestra de material menor de 1 tamiz de 75 μm (#200).

Tabla 2. Valor de azul de metileno y el comportamiento esperado.

Valor de Azul de metileno (mg/m)	desempeño Anticipado
≤6	excelente
7 a 12	aceptable
13 a 19	con problemas
≥20	malo

Después de cada incremento se retira del recipiente una pequeña cantidad de agua con la muestra, empleando una varilla agitadora de vidrio y se deja caer en forma de gota sobre un papel filtro. Cuando la muestra de agregado no pueda adsorber mas 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 arena.

3.2.4 Gravedad específica y absorción de agregados finos (I.N.V.E-222-07)

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de gravedades específicas BULK y aparente, así como la absorción de agregados finos.

Este método determina (después de 15 horas de agua) la gravedad específica BULK y la aparente como están definidas en la norma I.N.V.E-223, la gravedad específica BULK basada en la masa saturada y superficialmente seca del agregado, y la absorción como está definida en la norma I.N.V.E -223.

3.2.5 Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico norma técnica colombiana para el sector de la construcción (ICONTEC 226).

Se debe colocar una muestra de 50 g del material en el tamiz que se utiliza limpio y seco con el fondo colocado. No deben emplearse maquinas de lavado, sondas ni pedazos de metal sobre el tamiz. Mientras se mantiene el tamiz y el fondo (sin la tapa) en ambas manos, la operación de tamizado se debe hacer con un movimiento suave de muñeca hasta que mayoría del material fino halla pasado y el residuo tenga una apariencia limpia. Esta operación requiere, generalmente de 3 a 4 minutos solamente. Cuando el residuo este limpio, debe colocarse la tapa y retirarse el fondo. Entonces, se debe coger en la mano el tamiz tapado, golpeándolo suavemente por el lado, con el mango de la brocha empleado para limpiarlo. El polvo adherido al tamiz puede retirarse para mantener la parte inferior limpia. Debe desocuparse el fondo y limpiarse cuidadosamente con una tela antes de colocarse nuevamente el tamiz y retirarse la tapa. Cualquier material grueso que haya sido retenido en la tapa, se debe colocar nuevamente en el tamiz. (Metodología tomada de: Diseño de concretos de alta resistencia a partir de una puzolana natural. Mancipe J; Pereira L, Bermúdez G.)

Figura 5. Determinación de la finura del cemento por el tamiz 200



3.3 PREPARACION GEOPOLIMERICA

Se genera una mezcla para la realización del nuevo geopolímero basado en las siguientes relaciones minerales.

3.3.1 Mezclas, moldes y relleno

Se fabricaron una serie de geopolímeros (mezclas) con una variación en el porcentaje del cemento, el clinker, la arena, el agua, y el agente activante. Esta mezcla mecánica se realizó de acuerdo a la norma INV E – 321.

Para la realización de las probetas, se utilizaron cubos de 50 mm o (2") se requirieron moldes que no tuvieran más de tres (3) compartimentos, ni constaran de más de dos (2) elementos separables. Estos elementos deben estar dotados de dispositivos que aseguren una perfecta y rígida unión; fueron fabricados de metal duro, no atacable por las mezclas de cemento. Para moldes nuevos el valor de la dureza Rockwell del metal no deberá ser menor de 55 HRB. Los lados de los moldes deberán ser lo suficientemente rígidos para prevenir ensanchamientos o pandeos en los especímenes.

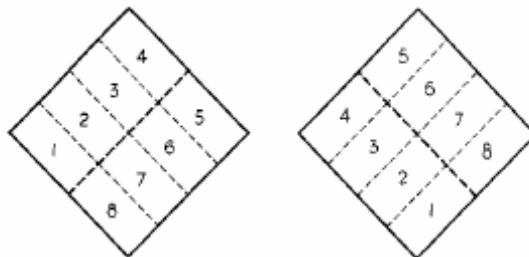
Para moldes nuevos, las caras interiores, serán planas y lisas con variación máxima de 0.025 mm; la distancia entre las caras opuestas, (50mm) tendrá variación máxima de $\pm 0.13\text{mm}$ y la altura de 50mm tendrá una variación permisible de $\pm 0.25\text{mm}$. El ángulo formado por las caras interiores adyacentes será de $90^\circ \pm 0.5^\circ$. Para moldes en uso, las caras interiores serán planas y lisas con variación máxima de 0.05 mm; la distancia entre las caras opuestas, (50mm) tendrá variación máxima de $\pm 0.5\text{mm}$ y la altura de 50 mm tendrá una variación permisible de $\pm 0.25\text{mm}$. El ángulo formado por las caras interiores adyacentes será de $90 \pm 0.5^\circ$.

Se limpió y se secó la plataforma de la mesa de flujo, se colocó el molde en el centro, se vertió en el molde una capa del mortero que se requiere ensayar, de unos 25 mm (1") de espesor, y se apisonó con 20 golpes del compactador, uniformemente distribuidos. Con una segunda capa de mortero, se llenó

totalmente el molde y se apisonó como la primera capa. La presión del compactador será la suficiente que asegure el llenado uniforme del molde. Se retiró el exceso del mortero de la capa superior y se alisó la superficie por medio de un palustre. Una vez el molde lleno, se limpio y se seco la plataforma de la mesa, teniendo cuidado de secar el agua que está alrededor de la base del molde.

Después de un (1) minuto de terminada la operación de mezclado, se retiro el molde, levantándolo e inmediatamente se deja caer la mesa de flujo desde una altura de 13 mm (1/2") 25 veces en 15 segundos. Luego se midió el diámetro de la base de la muestra, por lo menos en cuatro puntos equidistantes y se calculo el diámetro promedio. Después de preparado el mortero, se dejo quieto en la mezcladora por 90 segundos, sin cubrirla. Durante los últimos 15 segundos de este intervalo, rápidamente se raspo el mortero pegado en las paredes y luego se mezclo por 15 segundos a velocidad lenta.

Figura 6. Orden de los golpes para la fabricación de morteros.



Los golpes de cada etapa se dieron siguiendo una dirección perpendicular a los de la anterior; la presión del compactador será tal, que asegure el llenado de los compartimentos. Se completaron las cuatro (4) etapas de compactación, en cada compartimiento, antes de seguir con el siguiente paso. Una vez se termino la etapa de la primera capa en todos los compartimentos, se lleno con una segunda capa y se procedió como en la primera.

Durante la compactación de la segunda capa, al completar cada etapa y antes de iniciar la siguiente, se introdujo en el compartimiento el mortero que se ha depositado en los bordes del molde. A lo largo de estas operaciones,

utilizaremos guantes de caucho. Al finalizar la compactación, las caras superiores de los cubos, quedaron un poco más altas que el borde superior de los moldes. La superficie de los cubos fue alisada con la parte plana del palustre, retirando el mortero sobrante, con un movimiento de vaivén.

Dentro de un tiempo transcurrido no mayor de 2 minutos y 30 segundos después de completar la mezcla original de la bachada, se inicio el llenado de los compartimentos, colocando una capa de más o menos 25 mm (1") de espesor (aproximadamente la mitad del molde), en cada uno de los compartimentos, y se apisono con 32 golpes en 10 segundos, que se aplicaron sobre la superficie, en 4 etapas de 8 golpes adyacentes cada una (ver figura 6).

Figura 7. Moldes para la fabricación de morteros.



A los moldes se les aplico en sus caras interiores una capa delgada de aceite mineral ligero. Las superficies de contacto de los elementos separables se revistieron de una capa de aceite mineral pesado, luego se unieron estos elementos y se elimino el exceso de aceite en cada uno de los compartimentos. Luego se coloco el molde sobre una placa plana, no absorbente, cubierta con una delgada capa de aceite. En la parte exterior de las juntas de las partes que componen el molde, o de éstos con la placa, se aplico una mezcla de 3 partes en peso de parafina y 5 partes de resina o cera calentada a 110°C - 120° C, para impermeabilizarlo.

3.3.1.1 Mezcla Patrón (100% CPO)

En la fabricación de la mezcla patrón (figura 10a), se utilizaron proporciones en masa de una parte cemento seco por 2.75 partes de arena gradada seca. La cantidad de agua de amasado, para los cementos portland sin adicciones debe ser aquella que produzca una relación mínima de agua/cemento de 0.485 ($A/c=0.485$). Las cantidades de los elementos anteriores que deben ser mezclados a un tiempo para obtener 6 morteros de ensayo, deben ser 500 g de cemento y 1375 g de arena, según la norma 220 I.N.V.E.

Para la mezcla patrón (figura 10a), se realizaron 33 morteros de ensayo (11 moldes), estas probetas posteriormente fueron sometidas a una serie de pruebas de resistencia a la compresión, al ataque con ácido sulfúrico (H_2SO_4), al ataque con sulfato de magnesio ($MgSO_4$) y sometidas a altas temperaturas ($300^{\circ}C$, $600^{\circ}C$ y $1000^{\circ}C$) en un horno d8 serie 783 terrígeno (Figura 8).

Figura 8. Horno d8 serie 783 terrígeno



3.3.1.2 Mezcla 1 (95% Clinker – 5% CPO)

En la fabricación de la mezcla 1 (95% clinker – 5% CPO), se utilizaron proporciones en masa de 138.28 g de hidróxido de sodio ($NaOH$ [8M]), 345.6

g de silicato de sodio (Na_2SiO_3), 2750 g de arena natural, 950 g de clinker natural y 50 g de CPO, según la norma 220 I.N.V.E.

Para la mezcla 1 (95% clinker – 5% CPO), se realizaron 33 morteros de ensayo (11 moldes) para curado a temperatura ambiente a 24 horas (figura 10b), de igual manera, se realizaron otros 33 morteros para curado a 80°C a 36 horas (figura 10c), en un Horno binder (Figura 9). Estas probetas posteriormente fueron sometidas a una serie de pruebas de resistencia a la compresión, al ataque con ácido sulfúrico (H_2SO_4), al ataque con sulfato de magnesio (MgSO_4) y sometidas a altas temperaturas (300°C , 600°C y 1000°C).

Figura 9. Horno binder para curado a 80°C



3.3.1.3 Mezcla 2 (65% Clinker – 35% CPO)

En la fabricación de la mezcla 2 (65% clinker – 35% CPO), se utilizaron proporciones en masa de 138.28 g de hidróxido de sodio (NaOH [8M]), 345.6 g de silicato de sodio (Na_2SiO_3), 2750 g de arena natural, 650 g de clinker natural y 350 g de CPO, según la norma 220 I.N.V.E.

Para la mezcla 2 (65% clinker – 35% CPO), se realizaron 33 morteros de ensayo (11 moldes) para curado a temperatura ambiente a 24 horas (figura 10d), de igual manera, se realizaron otros 33 morteros para curado a 80°C a 36

horas (figura 10e), en un Horno binder (Figura 9). Estas probetas posteriormente fueron sometidas a una serie de pruebas de resistencia a la compresión, al ataque con ácido sulfúrico (H_2SO_4), al ataque con sulfato de magnesio ($MgSO_4$) y sometidas a altas temperaturas (300°C, 600°C y 1000°C).

3.3.1.4 Mezcla 3 (30% Clinker – 70% CPO)

En la fabricación de la mezcla 2 (30% clinker – 70% CPO), se utilizaron proporciones en masa de 138.28 g de hidróxido de sodio (NaOH [8M]), 345.6 g de silicato de sodio (Na_2SiO_3), 2750 g de arena natural, 300 g de clinker natural y 700 g de CPO, según la norma 220 I.N.V.E.

Para la mezcla 3 (30% clinker – 70% CPO), se realizaron 33 morteros de ensayo (11 moldes) para curado a temperatura ambiente a 24 horas (figura 10f), de igual manera, se realizaron otros 30 morteros para curado a 80°C a 36 horas (figura 10g), en un Horno binder (Figura 9). Estas probetas posteriormente fueron sometidas a una serie de pruebas de resistencia a la compresión, al ataque con ácido sulfúrico (H_2SO_4), al ataque con sulfato de magnesio ($MgSO_4$) y sometidas a altas temperaturas (300°C, 600°C y 1000°C).

3.3.1.5 Mezcla 4 (5% Clinker – 95% CPO)

En la fabricación de la mezcla 4 (5% clinker – 95% CPO), se utilizaron proporciones en masa de 138.28 g de hidróxido de sodio (NaOH [8M]), 345.6 g de silicato de sodio (Na_2SiO_3), 2750 g de arena natural, 50 g de clinker natural y 950 g de CPO, según la norma 220 I.N.V.E.

Para la mezcla 4 (5% clinker – 95% CPO), se realizaron 33 morteros de ensayo (11 moldes) para curado a temperatura ambiente a 24 horas (figura 10h), de igual manera, se realizaron otros 33 morteros para curado a 80°C a 36 horas (figura 10i), en un Horno binder (Figura 9). Estas probetas posteriormente fueron sometidas a una serie de pruebas de resistencia a la compresión, al

ataque con ácido sulfúrico (H_2SO_4), al ataque con sulfato de magnesio ($MgSO_4$) y sometidas a altas temperaturas ($300^\circ C$, $600^\circ C$ y $1000^\circ C$).

Figura 10. Probetas: a) Mezcla patrón 100% CPO; b) Mezcla 1: geopolímeros curado a temperatura ambiente; c) Mezcla 1: geopolímeros curados a $80^\circ C$; d) Mezcla 2: geopolímeros curado a temperatura ambiente; e) Mezcla 2: geopolímeros curados a $80^\circ C$; f) Mezcla 3: geopolímeros curado a temperatura ambiente; g) Mezcla 3: geopolímeros curados a $80^\circ C$; h) Mezcla 4: geopolímeros curado a temperatura ambiente; i) Mezcla 4: geopolímeros curado a $80^\circ C$

Figura 10a.



10b.



10c.



10d.



10e.



10f.



10g.



10h.



10i.



3.4. CARACTERIZACION GEOPOLIMERICA

3.4.1 Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico (I.N.V. E – 323 – 07)

Este ensayo cubre la determinación del esfuerzo de compresión de morteros de cemento hidráulico, usando cubos de 50mm o (2") de lado. Los valores establecidos en unidades SI deben ser tomados como norma. Los valores que se muestran en paréntesis son solamente para información. Esta norma no tiene como propósito establecer reglas de seguridad asociada con su uso. Es responsabilidad de quien la use, establecer apropiadas prácticas de seguridad y salubridad y determinar la aplicabilidad de limitaciones regulatorias antes de su uso.

Este método de ensayo proporciona un medio para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico y otros morteros. Los resultados se pueden emplear para determinar la conformidad con las especificaciones y otros métodos de ensayos. No se deben emplear sus resultados para estimar la resistencia del concreto.

La temperatura del aire en las vecindades de los moldes, materiales, prensa, etc., será de $25.0^{\circ} \pm 3^{\circ} \text{C}$. El agua de mezclado y la cámara húmeda tendrán una temperatura de $25.0^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$ y esta Temperatura no deberá variar durante el ensayo en $\pm 1.7^{\circ} \text{C}$.

La humedad relativa no será menor del 50%. Se deberá comprobar el flujo del mortero conforme lo establecido en la norma INV E – 325.

Figura 11. Máquina para la compresión de las probetas de morteros geopoliméricos.



Los concretos para uso general tienen una resistencia a compresión entre 200 y 400 kg/cm² o 20 y 40 MPa (3000 y 6000 Lb/pulg²).

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.

3.4.2 Ataque con acido sulfúrico (H₂SO₄)

Esta prueba 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 experimento de resistencia al ataque con ácidos se realizó sobre el material cementante (morteros geopoliméricos y morteros de CPO); debido a que no existe un

procedimiento estándar mundial aceptado, el tipo y concentración de la solución acida a la cual los especímenes son expuestos puede ser variada.

Para el desarrollo del trabajo los especímenes fueron curados durante 28 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 tres 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 el ensayo de resistencia a la compresión, en el cual no hubo unos cambios significativos de pérdidas o aumentos de peso. Este se calculo tomando previamente el peso de la probeta al sumergirse y al extraerse del ácido.

3.4.3 Ataque con sulfato de magnesio ($MgSO_4$)

Este método de ataque por sulfatos se desarrolla fundamentalmente a la interacción fisicoquímica entre los minerales de la pasta de cemento hidratada y los iones sulfato del medio. Su consecuencia es la desintegración del concreto. La resistencia del concreto a los sulfatos depende de numerosos factores, tales como la permeabilidad del concreto, el tipo (Na_2SO_4 , $MgSO_4$ y $CaSO_4$) y concentración de sulfato presente y las características del cemento, entre los cuales el contenido de aluminato tricálcico es fundamental.

Esta prueba al 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. En el cual no hubo unos cambios significativos de pérdidas o aumentos de peso. Este se calculo tomando previamente el peso de la probeta al sumergirse y al extraerse del ataque con sulfato de magnesio.

3.4.4 Resistencia a altas temperaturas (300°C, 600°C, 1000°C)

Este método de ataque a altas temperaturas se desarrolla Para ver el comportamiento de las probetas en un periodo de tiempo de una hora y se trabajo con dos probetas de cada mezcla con 28 días de curado a temperatura ambiente (25 a 28°C); las probetas fueron expuestas a las temperatura de 300, 600 y 1000 °C. En cada caso se determinaron los cambios de resistencia mecánica.

Figura 12. Morteros sometidos a altas temperaturas en el Horno d8 serie 783 terrígeno.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS MATERIALES

En los siguientes análisis se busca sacar la mayor caracterización de los materiales para la realización del nuevo diseño en el desarrollo de los geopolímeros.

4.1.1 Difracción de rayos X (DRX)

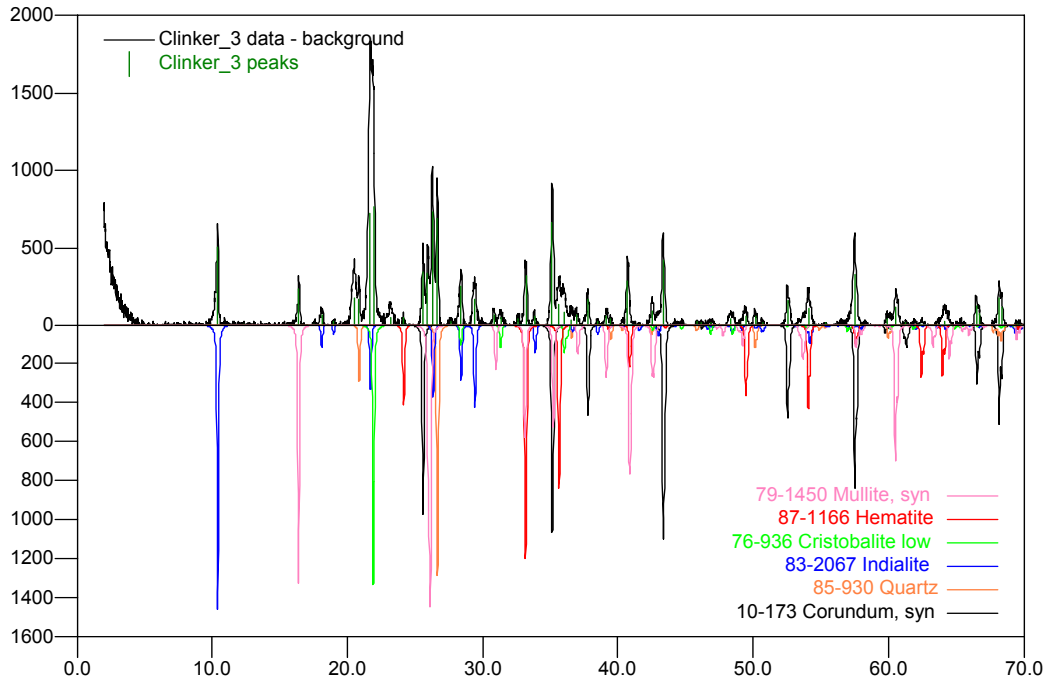
Se realizó un análisis mineralógico por Difracción de Rayos-X (DRX) para determinar las diferentes fases minerales cristalinas y amorfas de los cuatro materiales.

4.1.1.1 Clinker

Tabla 3. Minerales que presenta el clinker bajo la prueba del DRX

Fase	Formula
Corundum	$Al_2 O_3$
Quartz	$Si O_2$
Indialite	$Mg_{1.40} Fe_{0.66} Al_{3.96} Si_{5.04} O_{18}$
Cristobalite low	$Si O_2$

Figura 13. Grafica del Espectro mineralógico del clinker



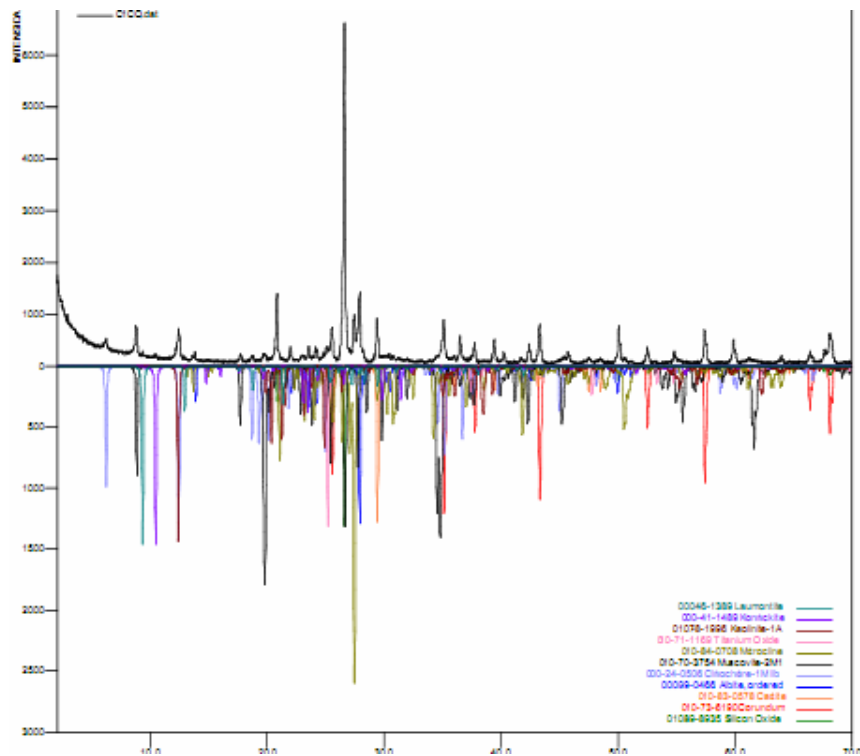
4.1.1.2 Arena

Tabla 4. Composición mineralógica de la arena natural de Pescadero

	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.
	$Ca_8 Al_8 Si_{16} O_{48} \cdot 14 H_2O$	000-46-1389	Leumontita	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)
	$K (Al_4 Si_2 O_{10} (OH)_2)$	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 %

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

Figura 14. Grafica del espectro mineralógico de la arena.



4.1.2 Granulometría

En este análisis se genera una caracterización de los tipos de grano y tamaño para su posterior caracterización y clasificación en los diferentes rangos de la norma I.N.V.E 220.

4.1.2.1 Arena

Tabla 5. Análisis granulométrico de la arena.

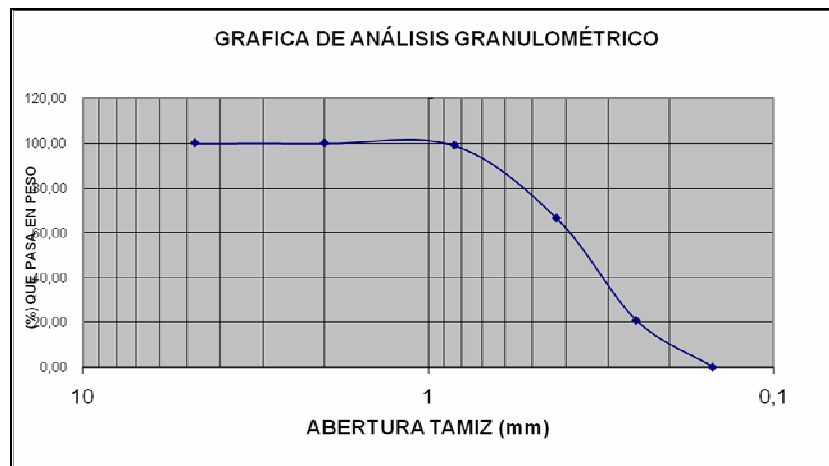
TAMIZ No	ABERTURA TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (g)	(%) RETENIDO	(%) QUE PASA
Nº 8	2	0	0	100
Nº 16	1.18	0	0	100
Nº 30	0,6	19,6	0,98	99,02
Nº 40	0,425	650,2	32,51	66,51
Nº 50	0,25	911,4	45,57	20,94
Nº 100	0,15	415,3	20,77	0,18
PASA Nº 100			0	0,18

FINOS (%) =	0,18
ARENAS (%) =	99,83
GRAVAS (%) =	0,00

MÓDULO DE FINURA =	3,87
---------------------------	-------------

La arena natural de Pescadero arrojó unos resultados que cumplen con los valores mínimos exigidos por la norma ICONTEC 220.

Figura 15. Grafica del análisis granulométrico de la arena



4.1.3 Valor de azul de metileno en agregados finos (I.N.V.E -235-07)

Determinar la cantidad de material potencialmente dañino para la preparación de la muestra y facilitar la producción del geopolímero.

4.1.3.1 Arena

Se realizó este análisis a una muestra de arena limpia en una cantidad de 10 g, los resultados obtenidos fueron:

C = Concentración de solución de Azul de Metileno. mg azul/ml solución = 1000/5

V = Solución de Azul de Metileno requerida en titulación ml = 18

W = Material seco utilizado en la prueba gr = 10

$$VA = (C \cdot V) / W = 9$$

El análisis de la muestra arrojó un valor de Azul de Metileno (mg/g) de 9, lo que significa que es un valor marginalmente aceptable, porque su contenido de arcillas dañinas y materia orgánica es bajo.

4.1.4 Gravedad específica y absorción de agregados finos (I.N.V.E-222)

4.1.4.1 Clinker

Método para determinar el peso específico y la absorción de los agregados finos (1 ensayo) Norma Técnica Colombiana para el sector de la construcción (ICONTEC 222).

Cálculos:

A = Peso al aire de la muestra secada en el horno,
= 389 g.

B = Peso del picnómetro aforado lleno de agua
= 640 g.

C = Peso total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua
= 873 g.

S = Peso al aire de la muestra saturada con superficie seca,
= 400 g.

Peso Especifico Aparente = $A / B + S - C = 2.32$

Peso Especifico Aparente Saturada y superficialmente seca = $S / + B + S - C = 2.40$

Peso específico nominal = $A / B + B - C = 2.49$

Absorción máxima (%) = $S - A / A * 100 = 2.83$

4.1.4.2 Cemento portland ordinario tipo I (CPO)

Método de ensayo para determinar el peso específico del cemento hidráulico (1 ensayo) Norma técnica Colombiana para el sector de la construcción (ICONTEC 221).

Se llena el frasco Chatelier con Kerosene hasta un punto situado entre las marcas 0 y 1 ml, se limpio el interior del frasco y se agrego 64g de cemento en pequeñas cantidades,

observando que el cemento no se adhiere a las paredes del frasco, se colocó el tapón y se giró en posición inclinada, hasta que asciendan burbujas a la superficie del líquido para sacar el aire.

CÁLCULOS:

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

PESO ESPECÍFICO $\frac{64 \text{ gr}}{(22.4 \cdot 0.5)} = 2.92 \text{ gr/ml}$

4.1.4.3 Arena

Método para determinar el peso específico y la absorción de los agregados finos (1 ensayo) Norma Técnica Colombiana para el sector de la construcción (ICONTEC 237).

Se tomó una muestra representativa de arena obtenida por cuarteo con un peso de 490 g, el cual se sumergió durante 24 horas, luego se colocó en una superficie no absorbente (mesón), donde lo secamos con una corriente de aire suave (secador) y otra parte en la estufa moviéndolo con frecuencia para conseguir un secado uniforme.

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

Después se tomó 500 gr 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 la dejamos en el horno por 24 horas en donde obtuvimos el peso seco.

CÁLCULOS:

$W = \text{Peso Seco} = 495 \text{ g}$

$W_{\text{probeta}} = \text{peso de la probeta} = 640 \text{ g}$

$W_s = \text{peso sumergido } W_w + W + W_{\text{probeta}} = 937$

$$805 = W_w + 495 + 179.5$$

$$W_w = 135.5 \text{ g}$$

$W_{\text{sss}} = \text{Peso saturado y superficialmente seco} = 500$

$DR = \text{Densidad Real} = W / V_a - W_w = 244 \text{ g}$

$DA = \text{Densidad aparente} = W / 500 - W_w = 2.46$

$D_{\text{asss}} = \text{densidad aparente y superficialmente seco} = W_{\text{sss}} / W_{\text{sss}} - W_s = 2.50$

$\%ABS = \text{Porcentaje de absorcion} = (W_{\text{sss}} - W / W) * 100 \% = 1.01 \%$

4.1.5 Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico. Norma ICONTEC 226

Este ensayo tiene como por objeto establecer y determinar la finura del cemento hidráulico por medio de los tamices ICONTEC 74 μ y 194 μ .

4.1.5.1 Cemento

Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico (2 ensayos) Norma Técnica Colombiana para el sector de la construcción (ICONTEC 226). Se tomaron 100gr de cemento, se tamizo con tapa, se retiro el fondo para pesa el material que paso el tamiz 200.

CÁLCULOS:

F = Finura del cemento 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 = 0.69gr

$F = 100 - Rc$

F = 99.31 %

4.2 RESULTADOS Y ANALISIS GEOPOLIMERICOS

Se presenta una serie de graficas representativas de los análisis de resistencia para su posterior interpretación.

4.2.1 Resistencia a la Compresión

Tabla 6. Resistencias promedios a la compresión. a) Curado a temperatura ambiente; b) Curado a temperatura 80°C.

6a.

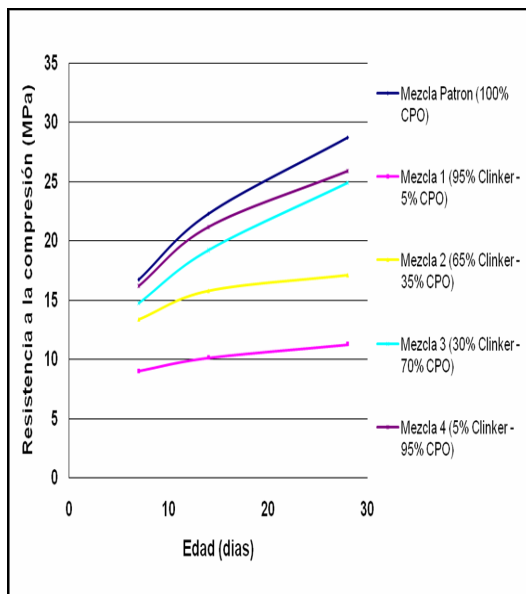
TIEMPO DE CURADO (días)	MEZCLA PATRON (100% CPO) (MPa)	MEZCLA (95% Clinker 5% CPO) (MPa)	MEZCLA 2 (65% Clinker 35% CPO) (MPa)	MEZCLA 3 (30% Clinker 70% CPO) (MPa)	MEZCLA 4 (5% Clinker 95% CPO) (MPa)
7	16,7	8,99	13,34	15,22	16,3
14	22,64	10,12	15,77	20,69	21,17
28	28,71	11,26	17,11	24,88	25,86

6b.

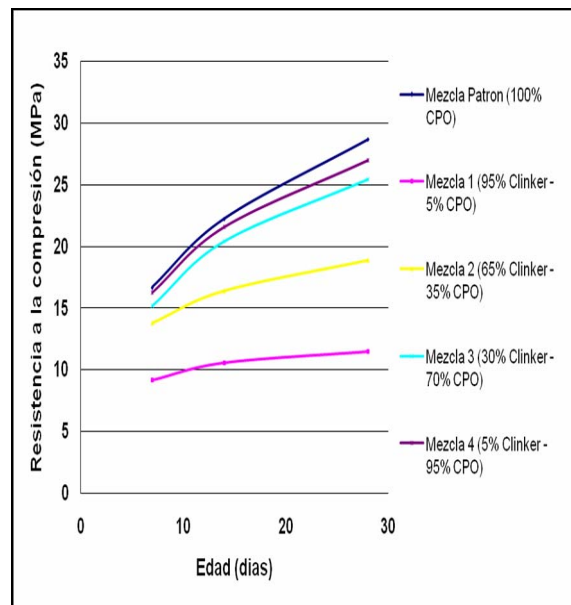
TIEMPO DE CURADO (días)	MEZCLA PATRON (100% CPO) (MPa)	MEZCLA 1 (95% Clinker 5% CPO) (MPa)	MEZCLA 2 (65% Clinker 35% CPO) (MPa)	MEZCLA 3 (30% Clinker 70% CPO) (MPa)	MEZCLA 4 (5% Clinker 95% CPO) (MPa)
7	16,7	9,21	13,78	16,35	16,54
14	22,26	10,58	16,35	21,3	21,59
28	28,71	11,46	18,86	25,43	26,99

Figura 16. Comportamiento promedios de la resistencia a la compresión, a) Curado a temperatura ambiente; b) Curado a temperatura 80°C

16a.



16b.



La figura 16a, comportamiento promedio de la resistencia a la compresión, indica que, el comportamiento generado durante los primeros 7, 14, 28 días en la mezcla 1 es el más bajo. Lo cual me dice, que de los porcentajes desarrollados en el trabajo es el menos resistente. Todo lo contrario pasa en la mezcla 4 ya que es la que más se me asemeja a la mezcla patrón, que es, en la que nos basamos para mantener un límite del 100% a 120% de resistencia. Esta mezcla patrón está hecha para mantener el rango, la mezcla patrón contiene 100% de CPO, a comparación de la mezcla 1 que tiene 5 % de CPO y 95 de clinker.

En la figura 16b, comportamiento promedio de la resistencia a la compresión (curado a temperatura 80°C), se puede observar que las probetas de la Mezcla Patrón (100% CPO) arrojaron unas resistencias a la compresión alrededor de 16 MPa para los primeros 7 días, 22 MPa para los 21 días y alrededor de 27 MPa para los 28 días, los cuales están dentro del rango de valores mínimos aceptados por las normas técnicas que maneja la industria cementera.

En el caso las probetas fabricadas para las diferentes mezclas, se puede observar que ninguna iguala el comportamiento de la mezcla patrón, todas están por debajo de estos valores. Para las mezclas 3 y 4, a los siete días, las probetas empiezan con unos resultados semejantes y a pasar los 28 días estos siguen semejantes pero no mejoran el comportamiento de la mezcla patrón. Por el contrario en las mezclas 1 y 2, los resultados iniciales son bajos en comparación con los resultados de la muestra patrón y al cabo de los 28 días, estos siguen la misma tendencia de resultados muy bajos.

4.2.2 Resistencia al ataque con ácido sulfúrico (H₂SO₄)

Tabla 7. Resistencias promedio al ataque con ácido sulfúrico (H₂SO₄), a) Curado a temperatura ambiente; b) Curado a temperatura 80°C.

7a.

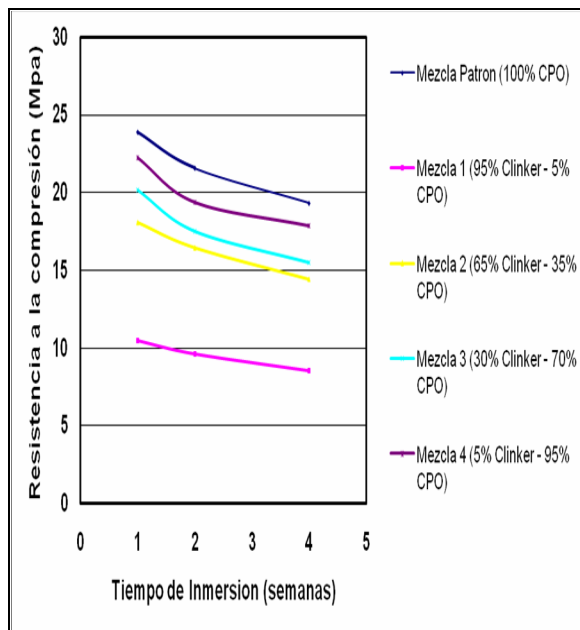
TIEMPO DE INMERSION (semanas)	MEZCLA PATRON (100% CPO) (Mpa)	MEZCLA 1 (95% Clinker 5% CPO) (Mpa)	MEZCLA 2 (65% Clinker 35% CPO) (Mpa)	MEZCLA 3 (30% Clinker 70% CPO) (Mpa)	MEZCLA 4 (5% Clinker 95% CPO) (Mpa)
1	23,85	10,48	18,08	20,17	22,25
2	21,56	9,63	16,46	17,5	19,36
4	19,33	8,56	14,44	15,47	17,84

7b.

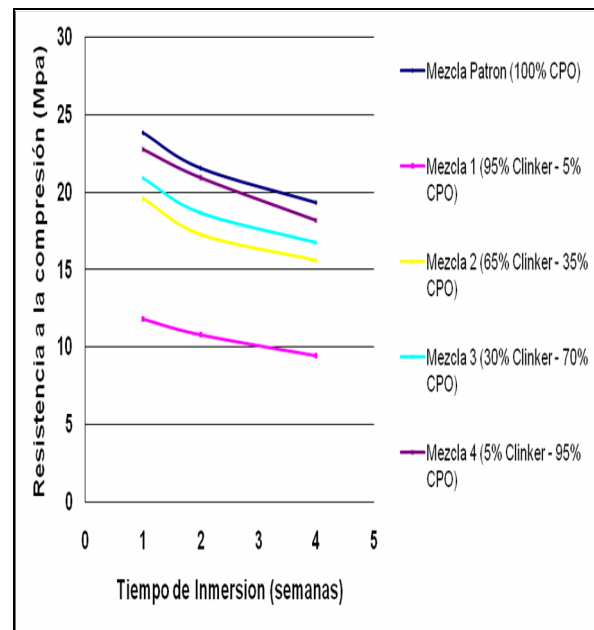
TIEMPO DE INMERSION (semanas)	MEZCLA PATRON (100% CPO) (MPa)	MEZCLA 1 (95% Clinker 5% CPO) (MPa)	MEZCLA 2 (65% Clinker 35% CPO) (MPa)	MEZCLA 3 (30% Clinker 70% CPO) (MPa)	MEZCLA 4 (5% Clinker 95% CPO) (MPa)
1	23,85	11,81	19,58	20,91	22,78
2	21,56	10,8	17,28	18,66	20,94
4	19,33	9,44	15,63	16,72	18,17

Figura 17. Comportamiento promedio de la resistencia al ataque con acido sulfúrico (H_2SO_4), a) Curado a temperatura ambiente; b) curado a temperatura 80°C

17a.



17b.



En la figura 17a, el ataque con acido sulfúrico (H_2SO_4), vemos que en general que la tendencia se mantiene con la de la mezcla patrón generándonos una buena expectativa ante esta prueba en las mezcla 2, 3 y 4. vemos que la variación en las mezcla 2, 3 y 4 al aumentar el tiempo, es constante y no tiene ningún cambio brusco esto nos genera confianza al saber que la estructura interna del geopolímero tampoco

es afectada bruscamente por el ácido. Para la mezcla 1, el resultado es bajo al cabo de los 7 días y sigue una tendencia negativa al cabo de los 28 días.

En la figura 17b, comportamiento promedio de la resistencia al ataque con ácido sulfúrico (H_2SO_4) (Curado a Temperatura $80^\circ C$), se puede apreciar que la muestra patrón (100% CPO), a la primera semana después de esta a curado 21 días a una temperatura de $80^\circ C$, tiene una resistencia de 24MPa, al cabo de dos semanas disminuye, obteniendo un valor de 21MPa y pasadas 4 semanas, la resistencia es de 19MPa, esto indica que el ácido deteriora al CPO en poco tiempo.

Para el caso de las mezclas, todas presentan una disminución en la resistencia, debido a la interacción química que hay entre las probetas y el ácido sulfúrico de pH 1, causándoles en poco tiempo, un deterioro en las propiedades cementantes a cada una de las mezclas.

Las mezclas 2, 3 y 4, muestran una tendencia semejante pero menor, en el comportamiento, comparándola con la de la muestra patrón. Para la mezcla 1, este comportamiento tiene una disminución bastante drástica en valores de resistencia a la compresión, comparadas con los valores de la muestra patrón.

4.2.3 Resistencia al ataque con sulfato de magnesio ($MgSO_4$)

Tabla 8. Resistencias promedio al ataque con sulfato de magnesio ($MgSO_4$), a) Curado a temperatura ambiente; b) Curado a temperatura $80^\circ C$.

8a.

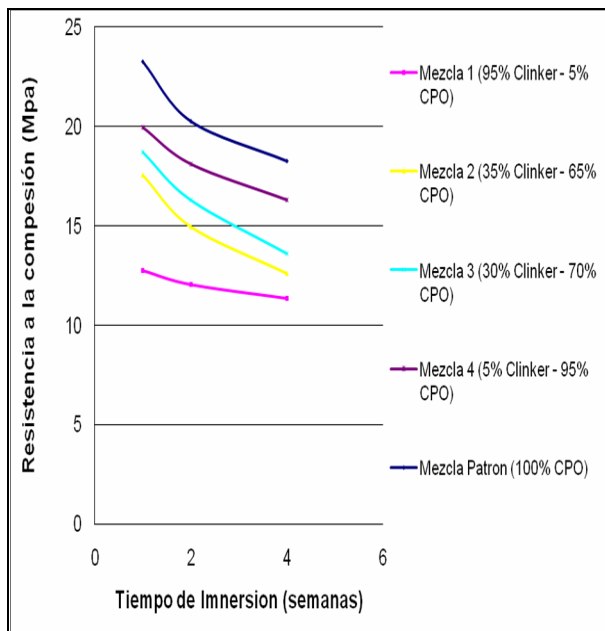
TIEMPO DE INMERSION (semanas)	MEZCLA PATRON (100% CPO) (MPa)	MEZCLA 1 (95% Clinker 5% CPO) (MPa)	MEZCLA 2 (65% Clinker 35% CPO) (MPa)	MEZCLA 3 (30% Clinker 70% CPO) (MPa)	MEZCLA 4 (5% Clinker 95% CPO) (MPa)
1	23,26	9,73	17,57	18,68	19,96
2	20,26	9,04	14,97	16,28	18,1
4	18,26	8,35	12,61	13,6	16,28

8b.

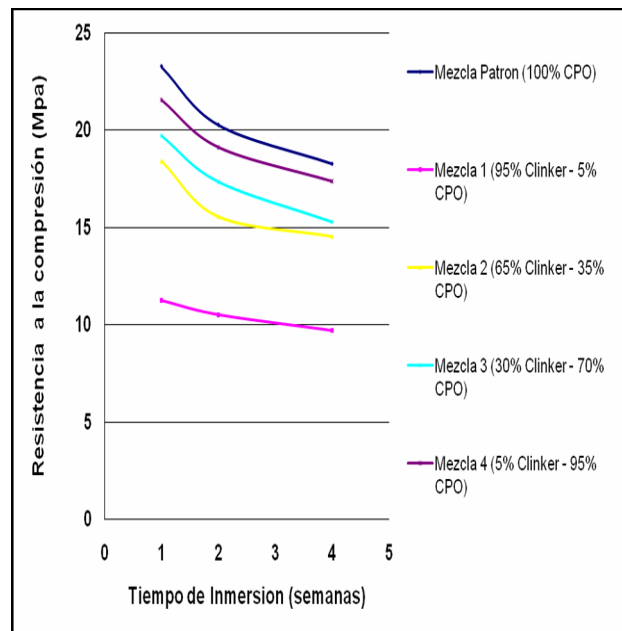
TIEMPO DE INMERSION (semanas)	MEZCLA PATRON (100% CPO) (MPa)	MEZCLA 1 (95% Clinker 5% CPO) (MPa)	MEZCLA 2 (65% Clinker 35% CPO) (MPa)	MEZCLA 3 (30% Clinker 70% CPO) (MPa)	MEZCLA 4 (5% Clinker 95% CPO) (MPa)
1	23,26	11,25	18,43	19,73	21,54
2	20,26	10,52	15,57	17,35	19,13
4	18,26	9,69	14,54	15,27	17,39

Figura 18. Comportamiento promedio de la resistencia al ataque con sulfato de magnesio ($MgSO_4$), a) Curado a temperatura ambiente; b) curado a temperatura 80°C.

18a.



18b.



En la figura 18a, podemos observar que la mezcla 1, después de un tiempo de fraguado, sometida al Ataque con Sulfato de Magnesio ($MgSO_4$), me varía de manera brusca en los valores de la resistencia a la compresión y es la que menos tiene cambios durante el Ataque con Sulfato de Magnesio ($MgSO_4$), a lo largo del tiempo

estimado, esto se puede observar mediante su baja pendiente. Todo lo contrario le ocurre a la mezcla patrón, ya que después de un tiempo sufre un cambio brusco, que podemos llegar a pensar sea una rotura en el material, se puede observar tomando su pendiente negativa.

Se confirma que el ataque con sulfato de magnesio (MgSO_4) en la curva patrón que contiene 100% de cemento, ataca agresivamente al CPO.

En la figura 18b, comportamiento promedio de la resistencia al ataque con sulfato de magnesio (MgSO_4) (Curado a Temperatura 80°C), se puede apreciar que la muestra patrón (100% CPO), a la primera semana después de esta a curado 21 días a una temperatura de 80°C , tiene una resistencia de 24MPa, al cabo de dos semanas disminuye, obteniendo un valor de 21MPa y pasadas 4 semanas, la resistencia es de 18MPa, mostrando así un deterioro más marcado en la primera semana después de la inmersión, que en las próximas semanas.

En el caso de las mezclas, el sulfato de magnesio (MgSO_4) afecta claramente a las mezclas 2, 3 y 4 en la primera semana, teniendo un parecido en el comportamiento de la muestra patrón y lo mismo sucede, con el comportamiento en las próximas semanas. Por otro lado, en la mezcla 1, el deterioro con el Sulfato de Magnesio (MgSO_4) es menor a lo largo de las cuatro semanas.

4.2.4 Resistencia a altas temperaturas (300°C, 600°C, 1000°C)

Tabla 9. Resistencias promedio a la alta temperatura, a) Curado a temperatura ambiente; b) Curado a temperatura 80°C.

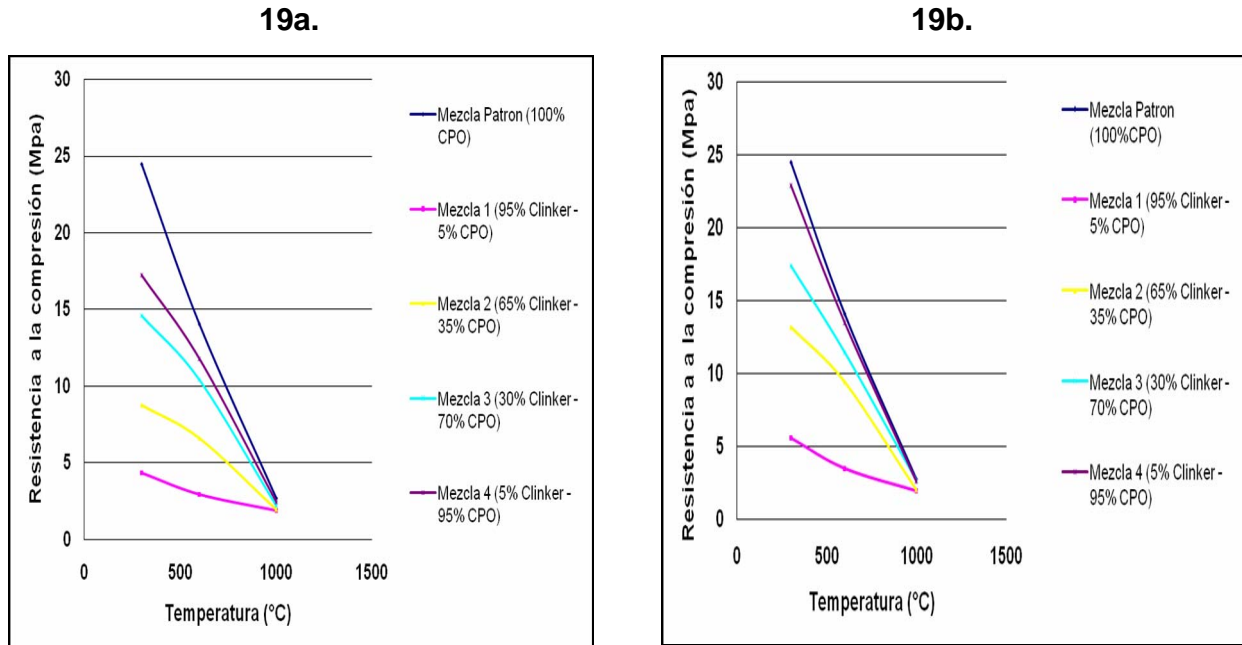
9a.

GRADOS (°C)	MEZCLA PATRON (100% CPO) (MPa)	MEZCLA 1 (95% Clinker 5% CPO) (MPa)	MEZCLA 2 (65% Clinker 35% CPO) (MPa)	MEZCLA 3 (30% Clinker 70% CPO) (MPa)	MEZCLA 4 (5% Clinker 95% CPO) (MPa)
300	24,47	4,35	8,76	14,59	17,21
600	14,06	2,94	6,61	10,24	11,78
1000	2,71	1,9	1,96	2,23	2,44

9b.

GRADOS (°C)	MEZCLA PATRON (100% CPO) (MPa)	MEZCLA 1 (95% Clinker 5% CPO) (MPa)	MEZCLA 2 (65% Clinker 35% CPO) (MPa)	MEZCLA 3 (30% Clinker 70% CPO) (MPa)	MEZCLA 4 (5% Clinker 95% CPO) (MPa)
300	24,47	5,54	13,15	17,34	22,86
600	14,06	3,46	9,39	11,41	13,46
1000	2,71	1,92	1,99	2,36	2,56

Figura 19. Comportamiento promedio de la resistencia a altas temperaturas, a) curado a temperatura ambiente; b) Curado a temperatura 80°C.



En la figura 19a, comportamiento promedio de la resistencia a altas temperaturas (curado a temperatura ambiente), se puede observar que el comportamiento de la mezcla patrón al someterla a altas temperaturas, disminuye de una forma vertiginosa. En las mezclas 1,2, 3 y 4 el deterioro de las probetas es de la misma forma y todas las mezclas llegan a arrojar un valor estimado de 3MPa, cuando se les aplica una temperatura de 1000°C, esto indica que independiente del porcentaje de CPO a los 1000°C la resistencia a la compresión para todas la mezclas es deficiente.

En la figura 19b, comportamiento promedio de la resistencia a altas temperaturas (curado a 80°C), se puede observar que el comportamiento de la mezcla patrón al someterla a altas temperaturas, disminuye de una forma vertiginosa, en la mezcla 4 sucede algo muy parecido; en la mezcla 3, la disminución de la resistencia también cae, pero de una forma menos vertiginosa, muy parecida al comportamiento de la mezcla 2 y en la mezcla 1, el deterioro por el sometimiento a altas temperaturas es suave, comparado con el deterioro mostrado por la mezcla patrón. Esto indica que a menor cantidad de CPO el deterioro por

las altas temperaturas es menor hasta una temperatura de 1000°C, puesto que el comportamiento de todas las mezclas converge cerca de esta temperatura.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de resistencia a la compresión en las pruebas CPO-clinker obtenidos a la edad de 28 días, el geopolímero con mayor resistencia a la compresión es el de la mezcla 4 (5% clinker – 95% CPO).

Los geopolímeros curados a temperatura de 80°C, se comportaron mejor en la resistencia a la compresión que los geopolímeros curados a temperatura ambiente.

A medida que se reducen las proporciones del material reemplazante del CPO, las propiedades físico-mecánicas de los geopolímeros aumentan.

La mezcla patrón (100% CPO) se deterioro mayormente, luego de someterla a la prueba de altas temperaturas, en comparación con los resultados obtenidos por los geopolímeros.

Según los resultados obtenidos por la prueba de ataque con ácido sulfúrico (H_2SO_4), la mezcla 1 (95% clinker – 5% CPO) fue la que presentó menor resistencia a la compresión, en comparación con la mezcla patrón (100% CPO).

La interpretación de los resultados arrojados por la prueba de ataque con sulfato de magnesio ($MgSO_4$), la mezcla 1 (95% clinker – 5% CPO), fue la que mostró menor resistencia a la compresión, en comparación con la mezcla patrón (100% CPO).

RECOMENDACIONES

Se recomienda la utilización de diferentes proporciones del material reemplazante del CPO, en la fabricación de morteros geopoliméricos a base de clinker natural.

Es recomendable utilizar diferentes proporciones de la solución activante en la fabricación de morteros geopoliméricos a base de clinker natural.

De los geopolímeros y en general los desarrollados en el presente trabajo a base de clinker natural, podría pensarse en uso industrial en la construcción como materiales NO ESTRUCTURALES, como por ejemplo en el relleno de muros, tabiques no estructurales, morteros de protección, pisos, etc.

BIBLIOGRAFIA

- ACI 211.1. (1993). Proporcionamiento de Mezclas de Concreto (concreto normal, pesado y masivo), pp. 21-28. México D.F, México.
- C. Shi, P.E. GrattanBelew, J.A. Stegemann, *Constuction and Building Materials* 13, 279 (1999).
- Candela, S.; Quintero, J. Cartografía de las zonas de “clinker” en las áreas de minería de la mina El Cerrejón. Albania, Guajira. Trabajo de grado (Geólogo). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Colombia 2004.
- D. Lawrence, en *Leas’s chemistry of cement and concrete* (Arnold, 1997).
- DOE/EH-0320 (1993). The fire below: spontaneous combustión in coal. Environment Safety and Health Bulletin, No. 93-4. U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- Dondi, M., Marsigli, M., Fabbri, B. (1997). Recycling of urban and industrial wastes in brick production: a review. *Tile & Brick Int.*, Vol. 13, nº4, pp. 302-315..
- Escalante G. J. I., (2002). Materiales alternativos al cemento Portland. *Avance y perspectiva*, Vol. 21, pp. 79-88.
- Escalante, J.I., J.M. Nonell, A. Gorokhovsky, P.E. Fraire, H.M. Molinar y G.M. Suárez (2002). *Reactividad y Propiedades Mecánicas de la Escoria de Alto Horno Activada por Álcalis*. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 41, pp. 451-458.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research* 35, 1984-1992.

- García, R. J. L., (2006). *Manual Técnico de Construcción*. Holcim Apasco. pp. 75-81.
- Grudemo A. (1975). Development of strength properties of hydrating cement pastes and their relation to structural features, Proc. Symp. On Some Recent Research on Cement Hydration, Cembereu.
- Hewlett P. C., (2005). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Cuarta Edición.
- J. Davidovits, Emerging technologies symposium on cement and concretes in the global environment (Portland Cement Association, 1993).
- K.S. Wang, K.L. Lin, Z.Q. Huang, *Cement and Concrete Res.* 31, 97 (2001).
- Kosmatka H., (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, EU, Portland Cement Association.
- Lyman, R. y Volkmer, J. (2001). Pyrophoricity (spontaneous combustion) of Powder River Basin coals—considerations for coalbed methane development. En <http://www.wsgs.uwyo.edu/Coal/CR01-1.pdf>, 12 Págs.
- Mancipe J; Pereira L; Bermudez D. *Diseño de concretos de alta resistencia a partir de una puzolana natural*. Universidad de la salle. Bogota D.C. 2007.
- Mehta K. y Monteiro P., (1998). *Concreto, Estructura, propiedades y materiales*, Primera Edición, IMCYC.
- Minarikova, M., Skvara, F. (2005). Fixation of heavy metals in geopolymeric materials based on brown coal fly ash. In: *Proceedings of the world geopolymer*, p. 45–50.
- Normas Técnicas Colombianas. Norma NTC 4630. 1999.
- Pannunzio-Miner, E.; Villegas-Sanzana, M.; Carbonio, R. Análisis Cuantitativo de las Fases Presentes en Cemento Portland y Clinker por Medio de Análisis Rietveld de Patrones de Difracción de Rayos X de Polvos. *Materia*. 2003,8:270–276

- Rushdi Ibrahim Yousefa,, Bassam El-Eswedb, Mazen Alshaaerc, Fawwaz Khalili d, Hani Khourye (2009) The influence of using Jordanian natural zeolite on the adsorption, physical, and mechanical properties of geopolymers products Pg 379–387
- Sánchez de Guzmán, Diego, *Tecnología del Concreto y del Mortero* 2001.
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S.J., Lukey, G.C. (2002). The effect of composition and temperature on the properties of the fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, vol.89, pp. 63-73.
- Wang, S.D. y K.L. Scrivener (1995). *Hydration Products of Alkali Activated Slag Cement*. *Cement and Concrete Research*. Vol. 25, No. 03, pp. 561-571.

ANEXOS. A. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 1 (CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE)

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION DE MORTEROS (NORMA INV. E-323)							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
1	10/11/2009	17/11/2009	7	150	25	22,375	8,95
2			7	150	25	22,575	9,03
3							
4		24/11/2009	14	150	25	25,55	10,22
5			14	150	25	25,05	10,02
6							
7		08/12/2009	28	150	25	28,025	11,21
8			28	150	25	28,3	11,32
9							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(semanas)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
10	10/11/2009	08-Dic-09	1	150	25	26,525	10,61
11			1	150	25	25,875	10,35
12							
13		15/12/2009	2	150	25	23,95	9,58
14			2	150	25	24,225	9,69
15							
16		29-Dic-09	4	150	25	22,525	9,01
17			4	150	25	20,3	8,12
18							
19	10/11/2009	08-Dic-09	1	150	25	24,725	9,89
20			1	150	25	23,95	9,58
21							
22		15/12/2009	2	150	25	22,675	9,07
23			2	150	25	22,525	9,01
24							
25		29-Dic-09	4	150	25	21,125	8,45
26			4	150	25	20,625	8,25
27							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
28	10/11/2009	08-Dic-09	28	150	25	11,05	4,42
29			28	150	25	10,575	4,23
30			28	150	25	7,25	2,9
31			28	150	25	7,475	2,99
32			28	150	25	4,825	1,93
33			28	150	25	4,675	1,87

ANEXOS B. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 1 (CURADO A TEMPERATURA 80°C)

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION DE MORTEROS (NORMA INV. E-323)							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm ²)	(cm ²)	(KN)	(MPa)
1	11/11/2009	18/11/2009	7	150	25	22,65	9,06
2			7	150	25	23,4	9,36
3				150	25		
4		25/11/2009	14	150	25	25,725	10,29
5			14	150	25	27,175	10,87
6				150	25		
7		09/12/2009	28	150	25	28,125	11,25
8			28	150	25	29,2	11,68
9				150	25		
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(semanas)	(Kg/cm ²)	(cm ²)	(KN)	(MPa)
10	11/11/2009	09-Dic-09	1	150	25	29,125	11,65
11			1	150	25	29,95	11,98
12				150	25		
13		16/12/2009	2	150	25	26,55	10,62
14			2	150	25	27,45	10,98
15				150	25		
16		30-Dic-09	4	150	25	24,175	9,67
17			4	150	25	23,025	9,21
18				150	25		
19	11/11/2009	09-Dic-09	1	150	25	27,875	11,15
20			1	150	25	28,4	11,36
21				150	25		
22		16/12/2009	2	150	25	25,875	10,35
23			2	150	25	26,725	10,69
24				150	25		
25		30-Dic-09	4	150	25	24,125	9,65
26			4	150	25	24,35	9,74
27				150	25		
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm ²)	(cm ²)	(KN)	(MPa)
28	11/11/2009	09/12/2009	28	150	25	12,8	5,12
29			28	150	25	14,9	5,96
30			28	150	25	8,1	3,24
31			28	150	25	9,2	3,68
32			28	150	25	4,725	1,89
33			28	150	25	4,875	1,95

ANEXOS C. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 2 (CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE)

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION DE MORTEROS (NORMA INV. E-323)							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
1	13/11/2009	20/11/2009	7	150	25	33,675	13,47
2			7	150	25	33,025	13,21
3							
4		27/11/2009	14	150	25	38,9	15,56
5			14	150	25	39,95	15,98
6							
7		11/12/2009	28	150	25	43,125	17,25
8			28	150	25	42,425	16,97
9							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(semanas)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
10	13/11/2009	11-Dic-09	1	150	25	45,525	18,21
11			1	150	25	44,875	17,95
12							
13		18/12/2009	2	150	25	41,725	16,69
14			2	150	25	40,6	16,24
15							
16		01-Ene-09	4	150	25	35,525	14,21
17			4	150	25	36,7	14,68
18							
			(semanas)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
19	13/11/2009	11-Dic-09	1	150	25	43,125	17,25
20			1	150	25	44,725	17,89
21							
22		18/12/2009	2	150	25	35,175	14,07
23			2	150	25	39,675	15,87
24							
25		01-Ene-09	4	150	25	30,625	12,25
26			4	150	25	32,45	12,98
27							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
28	13/11/2009	11-Dic-09	28	150	25	22,35	8,94
29			28	150	25	21,45	8,58
30			28	150	25	16,7	6,68
31			28	150	25	16,35	6,54
32			28	150	25	4,775	1,91
33			28	150	25	5,025	2,01

ANEXOS D. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 2 (CURADO A TEMPERATURA 80°C)

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION DE MORTEROS (NORMA INV. E-323)							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	CARGA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
1	14/11/2009	21/11/2009	7	150	25	34,95	13,98
2			7	150	25	33,95	13,58
3							
4		28/11/2009	14	150	25	41,4	16,56
5			14	150	25	40,525	16,21
6							
7		12/12/2009	28	150	25	47,45	18,98
8			28	150	25	46,875	18,75
9							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	CARGA
			(semanas)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
10	14/11/2009	12-Dic-09	1	150	25	49,8	19,92
11			1	150	25	48,125	19,25
12							
13		19/12/2009	2	150	25	42,8	17,12
14			2	150	25	43,625	17,45
15							
16		02-Ene-10	4	150	25	39,875	15,95
17			4	150	25	38,3	15,32
18							
19	14/11/2009	12-Dic-09	1	150	25	46,575	18,63
20			1	150	25	45,6	18,24
21							
22		19/12/2009	2	150	25	39,775	15,91
23			2	150	25	38,075	15,23
24							
25		02-Ene-10	4	150	25	35,575	14,23
26			4	150	25	37,15	14,86
27							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	CARGA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
28	14/11/2009	12-Dic-09	28	150	25	33,125	13,25
29			28	150	25	32,65	13,06
30			28	150	25	23,95	9,58
31			28	150	25	23,025	9,21
32			28	150	25	5,025	2,01
33			28	150	25	4,925	1,97

ANEXOS E. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 3 (CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE)

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION DE MORTEROS (NORMA INV. E-323)							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
1	17/11/2009	24/11/2009	7	150	25	38,94	14,58
2			7	150	25	37,16	14,864
3							
4		01/12/2009	14	150	25	48,4	19,36
5			14	150	25	47,575	19,03
6							
7		15/12/2009	28	150	25	61,4	24,56
8			28	150	25	63,025	25,21
9							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(semanas)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
10	17/11/2009	15-Dic-09	1	150	25	50,55	20,22
11			1	150	25	50,325	20,13
12							
13		22/12/2009	2	150	25	44,125	17,65
14			2	150	25	43,4	17,36
15							
16		05-Ene-10	4	150	25	39,2	15,68
17			4	150	25	38,15	15,26
18							
19	17/11/2009	15-Dic-09	1	150	25	46,875	18,75
20			1	150	25	46,55	18,62
21							
22		22/12/2009	2	150	25	40,9	16,36
23			2	150	25	40,525	16,21
24							
25		05-Ene-10	4	150	25	33,05	13,22
26			4	150	25	34,95	13,98
27							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
28	17/11/2009	15-Dic-09	28	150	25	37,375	14,95
29			28	150	25	35,575	14,23
30			28	150	25	27,525	11,01
31			28	150	25	24,6	9,84
32			28	150	25	5,625	2,25
33			28	150	25	5,525	2,21

ANEXOS F. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 3 (CURADO A TEMPERATURA 80°C)

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION DE MORTEROS (NORMA INV. E-323)							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
1	18/11/2009	25/11/2009	7	150	25	37,475	14,99
2			7	150	25	38,375	15,35
3							
4		02/12/2009	14	150	25	50,05	20,02
5			14	150	25	51,95	20,78
6							
7		16/12/2009	28	150	25	63,025	25,21
8			28	150	25	64,125	25,65
9							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(semanas)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
10	18/11/2009	16-Dic-09	1	150	25	52,6	21,04
11			1	150	25	51,95	20,78
12							
13		23/12/2009	2	150	25	48,35	19,34
14			2	150	25	44,95	17,98
15							
16		06-Ene-09	4	150	25	43	17,2
17			4	150	25	40,625	16,25
18							
19	18/11/2009	16-Dic-09	1	150	25	49,525	19,81
20			1	150	25	49,125	19,65
21							
22		23/12/2009	2	150	25	43,4	17,36
23			2	150	25	43,375	17,35
24							
25		06-Ene-09	4	150	25	38,575	15,43
26			4	150	25	37,8	15,12
27							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
28	18/11/2009	16-Dic-09	28	150	25	43,075	17,23
29			28	150	25	43,625	17,45
30			28	150	25	28,2	11,28
31			28	150	25	28,85	11,54
32			28	150	25	6,7	2,68
33			28	150	25	6,475	2,59

ANEXOS G. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 4 (CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE)

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION DE MORTEROS DE HORMIGON (NORMA INV. E-323)							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
1	20/11/2009	20/11/2009	7	150	25	40,3	16,12
2			7	150	25	40,8	16,32
3							
4		04/12/2009	14	150	25	53,87	21,548
5			14	150	25	52,01	20,804
6							
7		18/12/2009	28	150	25	66,32	26,528
8			28	150	25	63,02	25,208
9							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(semanas)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
10	20/11/2009	18-Dic-09	1	150	25	55,375	22,15
11			1	150	25	55,9	22,36
12							
13		25/12/2009	2	150	25	49,35	19,74
14			2	150	25	47,475	18,99
15							
16		01-Ene-10	4	150	25	45,8	18,32
17			4	150	25	43,4	17,36
18							
19	20/11/2009	18-Dic-09	1	150	25	52,275	20,91
20			1	150	25	47,525	19,01
21							
22		25/12/2009	2	150	25	46,4	18,56
23			2	150	25	44,125	17,65
24							
25		01-Ene-10	4	150	25	41,4	16,56
26			4	150	25	40,025	16,01
27							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
28	20/11/2009	18-Dic-09	28	150	25	43,3	17,32
29			28	150	25	42,75	17,1
30			28	150	25	26,725	10,69
31			28	150	25	32,175	12,87
32			28	150	25	6,4	2,56
33			28	150	25	5,8	2,32

ANEXOS H. RESISTENCIA DE MORTEROS MEZCLA 4 (CURADO A TEMPERATURA 80°C)

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION DE MORTEROS DE HORMIGON (NORMA INV. E-323)							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
1	21/11/2009	28/11/2009	7	150	25	40,6	16,24
2			7	150	25	40,9	16,36
3							
4		05/12/2009	14	150	25	53,025	21,21
5			14	150	25	54,95	21,98
6							
7		19/12/2009	28	150	25	67,55	27,02
8			28	150	25	67,4	26,96
9							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(semanas)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
10	21/11/2009	19-Dic-09	1	150	25	56,375	22,55
11			1	150	25	57,55	23,02
12							
13		26/12/2009	2	150	25	52,55	21,02
14			2	150	25	52,175	20,87
15							
16		09-Ene-10	4	150	25	45,9	18,36
17			4	150	25	44,95	17,98
18							
19	21/11/2009	19-Dic-09	1	150	25	52,8	21,12
20			1	150	25	54,9	21,96
21							
22		26/12/2009	2	150	25	48,125	19,25
23			2	150	25	47,525	19,01
24							
25		09-Ene-10	4	150	25	43,925	17,57
26			4	150	25	43,025	17,21
27							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
28	21/11/2009	19-Dic-09	28	150	25	55,525	22,21
29			28	150	25	58,8	23,52
30			28	150	25	34,725	13,89
31			28	150	25	32,575	13,03
32			28	150	25	7,45	2,98
33			28	150	25	5,3	2,12

ANEXOS I. RESISTENCIA A LOS MORTEROS MUESTRA PATRON

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION DE MORTEROS DE HORMIGON (NORMA INV. E-323)							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
1	24/11/2009	01/12/2009	7	150	25	41,2	16,48
2			7	150	25	42,3	16,92
3		08/12/2009	14	150	25	56,12	22,448
4			14	150	25	55,2	22,08
5			22/12/2009	28	150	25	71,35
6		28		150	25	72,2	28,88
7							
8							
9							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(semanas)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
10	24/11/2009	22-Dic-09	1	150	25	60,35	24,14
11			1	150	25	58,9	23,56
12		29/12/2009	2	150	25	55,025	22,01
13			2	150	25	52,8	21,12
14		12-Ene-10	4	150	25	49,125	19,65
15			4	150	25	47,55	19,02
16							
17							
18							
19	24/11/2009	22-Dic-09	1	150	25	58,525	23,41
20			1	150	25	57,8	23,12
21		29/12/2009	2	150	25	50,425	20,17
22			2	150	25	50,9	20,36
23		12-Ene-10	4	150	25	46,225	18,49
24			4	150	25	45,075	18,03
25							
26							
27							
MORTERO No.	FECHA TOMA	FECHA DE ENSAYO	EDAD	CARGA ESP	ÁREA TOTAL	CARGA	RESISTENCIA
			(días)	(Kg/cm²)	(cm²)	(KN)	(MPa)
28	24/11/2009	22-Dic-09	28	150	25	60,22	24,088
29			28	150	25	62,14	24,856
30			28	150	25	35,97	14,388
31			28	150	25	34,33	13,732
32			28	150	25	6,12	2,448
33			28	150	25	7,45	2,98

ANEXOS J. VALOR DE AZUL DE METILENO EN AGREGADOS FINOS

Y EN LLENANTES MINERALES

INVE-235-07

OBRA	PROYECTO
SOLICITADO POR	GIOVANNY PERA Y HUGO RINCON
MATERIAL	ARENA DE PESCADERO
FECHA DE LOS ENSAYOS	DICIEMBRE 15 DE 2009

C	Concentración de solución de Azul de Metileno. mg azul/ml solución	1000/5
V	Solución de Azul de Metileno requerida en titulación ml	18
W	Material seco utilizado en la prueba gr	10

$$VA = \frac{C \times V}{W} = 9$$

Valor de Azul de Metileno (mg/g)	Desempeño anticipado
≤ 6	Excelente
7 - 12	Marginalmente aceptable
13 - 19	Problemas/Posible falla
≥ 20	Fallado

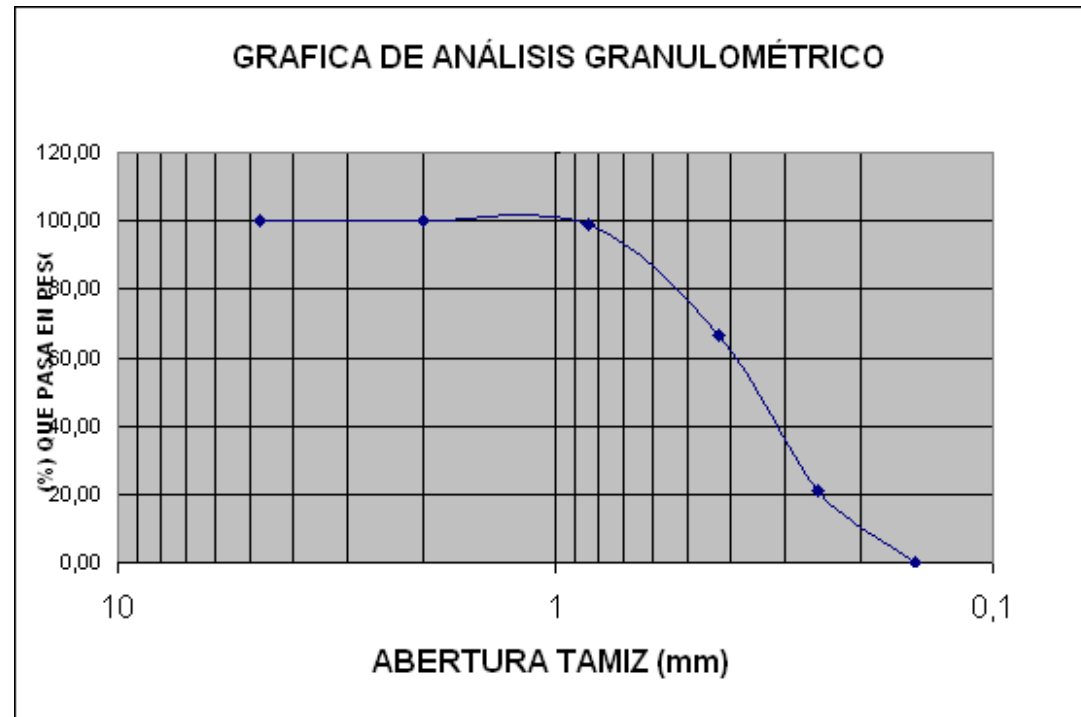
ANEXOS K. ANÁLISIS GRANULOMETRICO A LA ARENA DE PESCADERO

ANALISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO I.N.V.E-123

AGREGADO FINO - ARENA

OBRA	PROYECTO
SOLICITADO POR	GIOVANNY PEREA Y HUGO RINCON
MATERIAL	ARENA DE PESCADERO
FECHA DE ENSAYO	DICIEMBRE 18 DE 2009
PESO MUESTRA (gr)	2000

TAMIZ N°	ABERTURA TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (gr)	(%) RETENIDO	(%) QUE PASA
N° 8	4,75	0	0,00	100,00
N° 16	2	0	0,00	100,00
N° 30	0,84	19,6	0,98	99,02
N° 40	0,425	650,2	32,51	66,51
N° 50	0,25	911,4	45,57	20,94
N° 100	0,15	415,3	20,77	0,18
			0,00	0,18
FINOS (%) =		0,18		
ARENAS (%) =		99,83		
GRAVAS (%) =		0,00		
MÓDULO DE FINURA =		3,87		



ANEXOS L. PESO ESPECÍFICO Y ABSORCION DEL CLINKER
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS INVE - 222

OBRA	PROYECTO
SOLICITADO POR	GIOVANNY PEREA Y HUGO RINCON
MATERIAL	ARENA DE PESCADERO
FECHA DE ENSAYO	DICIEMBRE 17 DE 2009

A	Peso al aire de la muestra secada en el horno, (gr).			389
B	Peso del picnómetro aforado lleno de agua (gr).			640
C	Peso total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua (gr).			873
S	Peso al aire de la muestra saturada con superficie seca, (gr).			500

Peso específico aparente	2,32
Peso específico aparente saturada y superficialmente seca.	2,40
Peso específico nominal	2,49
Absorción máxima (%)	2,83