

**EVOLUCION MINERALOGICA Y TEXTURAL DE RESIDUOS DE
CONSTRUCCION Y DEMOLICION EN LA PREPARACION DE
GEOPOLIMEROS: RESISTENCIA MECANICA, DESEMPEÑO Y DURABILIDAD**

**FABIO AUGUSTO GOMEZ NAVAS
ELIANA PADILLA SERRANO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2013

**EVOLUCION MINERALOGICA Y TEXTURAL DE RESIDUOS DE
CONSTRUCCION Y DEMOLICION EN LA PREPARACION DE
GEOPOLIMEROS: RESISTENCIA MECANICA, DESEMPEÑO Y DURABILIDAD**

**FABIO AUGUSTO GOMEZ NAVAS
ELIANA PADILLA SERRANO**

Proyecto de grado para optar el título de Geólogo

**Director:
CARLOS ALBERTO RIOS REYES
Geólogo PhD**

**Codirector:
OSCAR MAURICIO CASTELLANOS ALARCON
Geólogo MSc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2013

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar por agradecer a Dios y a mis padres quiénes con un gran esfuerzo y dedicación forjaron en mi valores para ser una persona íntegra de buenos principios y con grandes deseos de superación, a ellos les debo todo lo que soy y seré.

A mi esposa quien ha estado conmigo durante este proceso, quien ha sido un apoyo incondicional tanto en mi vida personal como profesional, a mis hijos que han sido la mayor bendición que Dios puso en mi camino y la mayor alegría de mi diario vivir.

Por último y no menos importante al profesor Carlos Ríos quien durante todo este proceso estuvo al tanto de la ejecución del proyecto y me dio la oportunidad de alcanzar esta meta, gracias mil gracias.

Fabio Gómez

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de grado se lo dedico en primer lugar a Dios la prioridad de mi vida, que ha puesto en mi camino todos los recursos tanto humanos como materiales para la realización y ejecución de este proyecto.

A mi abuela materna, la Señora Esther Larrotta Vda. De Serrano, con quien permanecí desde los cinco años y formo en mí una mujer llena de valores y principios religiosos y quien me apoyo de manera incondicional junto a mis tías maternas Raquel y Mary, quienes velaron siempre por mi bienestar.

A mi padre José Hipólito Padilla Oviedo, quien desde el momento que ingreso a mi vida a los 17 años se preocupó por mi bienestar físico, material y espiritual acompañándome en todas las situaciones que he pasado desde ese momento.

A mi madre, Beatriz Serrano Larrotta quien a pesar de la distancia, ha estado conmigo representada en mi familia materna en mi abuela, tíos, primos y demás familiares con los que siempre he contado y aportó todo lo material que tenía a su alcance.

A nuestro profesor Carlos Alberto Ríos Reyes, quien con su paciencia conocimiento y experiencia nos orientó y creyó en nosotros.

A la Universidad Industrial de Santander, quien puso a nuestra disposición todos los laboratorios de Geología, Ingeniería Civil, Metalúrgica, Química (DRX) además de la colaboración con la que siempre contamos del personal administrativo y técnico.

A todas y cada una de las personas que siempre nos apoyaron y pusieron de uno u otro modo su granito de arena para que esta obra fuera una realidad.

A todos mi gratitud perenne. Dios los bendiga por siempre.

Eliana Padilla Serrano

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	21
PLANTEAMIENTO	22
1. OBJETIVOS	23
1.1 OBJETIVO GENERAL	23
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	23
2. MARCO TEORICO	24
2.1. GEOPOLIMEROS	24
2.1.1 Definición	24
2.1.2. Estructura química y propiedades de los geopolímeros	24
2.1.3. Reacción de geopolimerización	25
2.1.4. Efecto del silicato soluble	27
2.1.5. Efecto de los cationes (Na,K,Ca)	28
2.1.6. Efecto de la temperatura de curado y del tiempo de envejecimiento	28
2.1.7 Influencia a ataques de sulfatos	29
2.1.8. Historia y aplicaciones de los geopolímeros	29
2.2. CEMENTO	31
2.2.1. Definición	31
2.2.2. Propiedades físicas y mecánicas del cemento Portland	33
2.3. RESIDUOS DE CONSTRUCCION Y DEMOLICION (RCD)	35
2.3.1. Definición	35
2.3.2. Volumen	35
3. PARTE EXPERIMENTAL	37
3.1 MATERIALES, EQUIPOS Y SUMINISTROS	37
3.2 METODOLOGÍA	38
3.2.1 Desarrollo experimental	38

3.2.2. Preparación de los materiales	39
3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DE PARTIDA	41
3.3.1. Metodología	41
3.4. DISEÑO DE LA MEZCLA	45
3.4.1. Mortero de cemento Portland	46
3.4.2. Mortero geopolimérico	46
3.5. ELABORACIÓN DE PROBETAS	47
3.5.1. Ensayos realizados a las probetas	50
4. RESULTADOS Y DISCUSION	55
4.1 RESIDUO DE DEMOLICION	55
4.1.1. Descripción a escala macroscópica	55
4.1.2. Descripción de la sección delgada	55
4.1.3 Análisis mineralógico por Fluorescencia de Rayos X (FRX) del RCD	63
4.1.4. Análisis mineralógico (FRX)	65
4.1.5 Análisis de difracción de rayos X del RDC	69
4.1.6. Peso específico del RDC	70
4.1.7. Módulo de finura	71
4.2. ARENA	72
4.2.1. Descripción mineralógica y textural	72
4.2.2. Análisis granulométrico de la arena	73
4.2.3. Análisis mineralógico (DRX)	75
4.2.4. Peso específico y absorción de agregados finos	76
4.2.5. Cantidad de materia orgánica	76
4.3. CEMENTO	77
4.3.1. Peso específico	77
4.3.2. Módulo de finura	77
4.4. DISCUSION DE RESULTADOS	78
4.4.1. Resistencia a la compresión	78
4.4.2. Ataque de sulfatos	81
4.4.3. Ataque con ácidos	85

4.4.4. Comportamiento a altas temperaturas	89
5. CONCLUSIONES	92
6. RECOMENDACIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	95

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de formación del material geopolimérico descrito por Davidovits (1993) en Van Jaarsveld et al. (2007).	26
Figura 2. Proceso de producción del silicato de sodio.	28
Figura 3: Representación esquemática del desarrollo experimental	38
Figura 4. Equipos y materiales utilizados en la preparación de los materiales.(a) Residuo de demolición. (b) Trituradora de mandíbula. (c) Material triturado y tamizado. (d) Arena. (e) Cemento. (f) Solución activante.	40
Figura 5. Procedimiento para la elaboración de probetas	48
Figura 6. Equipos para medir la resistencia a la compresión	51
Figura 7. Fotografía a escala macroscópica del residuo de concreto	55
Figura 8.Cuarzoarenita de grano arena muy fina hasta arena fina, con formas de los granos desde subangular hasta subredondeados. Composicionalmente consta de cuarzo (Qtz) monocristalino principalmente, se observan pellets de glauconita, óxidos de hierro (goetita). Como minerales accesorios se observa circón, turmalina (Tur) y minerales dúctiles como la moscovita a nivel trazas	56
Figura 9. Lítico metasedimentario, compuesto principalmente por cuarzo y moscovita. El tamaño de los cuarzoes varía desde limo hasta arena muy fina; la moscovita está presente en forma a largada mostrando cierta orientación	57
Figura 10.Cuarzoarenita de grano arena fina a arena gruesa, con formas subangulares a subredondeados pobremente seleccionados. Compuesta principalmente por cuarzoes de origen ígneo y metamórfico. En los intersticios se observa una matriz de minerales arcillosos indiferenciados acompañada de óxido de hierro (goetita).	57

Figura 11. Cuarzoarenita de grano arena muy fina a limo con granos subredondeados, altamente cementada con sílice. Minerales accesorios como circón, turmalina	58
Figura 12. Cristal de plagioclasa altamente sericitizado, de forma subhedral, tamaño arena media.	58
Figura 13. Lítico sedimentario compuesto principalmente por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa. Los cuarzos presentan tamaño arena muy fina hasta arena media de formas angulares a subredondeadas. Las plagioclasas se presentan en cristales bien definidos con sus típicas maclas, también se observan ductilizadas, localmente sericitizadas. El feldespato potásico se observa en forma de intercrecimiento con cristales de cuarzo formando así la textura mirmequítica y gráfica, las cuales indican que el origen de estos cuarzos es ígneo. Como minerales accesorios se observa biotita, clorita (producto de la alteración de la biotita).	59
Figura 14. Cuarzo policristalino de origen metamórfico, posiblemente correspondiente a una cuarcita, los cristales de cuarzo son de forma subhedral, se observan levemente bandeados	60
Figura 15. Cuarzoarenita de grano arena fina a arena gruesa, con formas subangulares a subredondeados pobremente seleccionados. Compuesta principalmente por cuarzos de origen ígneo y metamórfico. En los intersticios se observa una matriz de minerales arcillosos indiferenciados acompañada de óxido de hierro (goetita).	60
Figura 16. Cuarzo policristalino de origen metamórfico, de tamaño guija	61
Figura 17. Mineral de moscovita que se observa ductilizada, tamaño arena media, con colores típicos de birrefringencia	61
Figura 18. Cristal de plagioclasa altamente sericitizado, tamaño arena media con forma subhedral.	62
Figura 19. Lítico sedimentario tipo chert, de textura microcristalina con tamaño arena muy gruesa, forma subredondeada. Se observan radiolarios.	62
Figura 20. Minerales opacos, correspondientes a óxidos de hierro (Goetita).	63

Figura 21. Lítico plutónico compuesto principalmente por cuarzo, plagioclasa. Como minerales accesorios presenta circón y clorita.	63
Figura 22. Fotografía a escala macroscópica del residuo de concreto. Los números y estrellas negras indican los puntos en donde se determinó la composición química por FRX.	64
Figura 23. Sección delgada del concreto.	65
Figura 24. Sección a 1mm y 3 mm de distancia de la fuente de energía.	65
Figura 25. Datos del análisis por FRX de la matriz del residuo de concreto.	66
Figura 26. Datos del análisis por FRX del punto 1 de la figura 23 de un agregado del residuo de concreto.	67
Figura 27. Datos del análisis por FRX del punto 1 de la figura 22 de un agregado del residuo de concreto.	68
Figura 28. Datos del análisis por FRX del punto 1 de la figura 22 de un agregado del residuo de concreto.	68
Figura 29. Perfil de DRX del residuo de concreto.	70
Figura 30. Análisis granulométrico de la arena.	75
Figura 31. Perfil de DRX de la arena	75
Figura 32. Resistencia a la compresión de los morteros	79
Figura 33. Resistencia a la compresión por ataques con sulfatos de magnesio (MgSO ₄)	83
Figura 34. Diagrama donde se muestra la pérdida de resistencia al ataque con MgSO ₄	84
Figura 35. Diagrama donde se muestra la pérdida de resistencia al ataque con H ₂ SO ₄ .	87
Figura 36. Resistencia al ataque de ácidos	88
Figura 37. Comportamiento a altas temperaturas	89
Figura 38. Pérdida de peso de las probetas por las altas temperaturas expresado en porcentaje	90

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Escombreras autorizadas por la CDMB	36
Tabla 2 Normatividad para seguimiento y control de Escombreras	36
Tabla 3 Especificaciones técnicas del NaOH	40
Tabla 4 Especificaciones técnicas del silicato de sodio neutro	42
Tabla 5. Proporciones utilizadas para la elaboración de morteros para la resistencia a la compresión	47
Tabla 6 Cálculo de probetas para la resistencia a la compresión	47
Tabla 7 Relación de tamices utilizados en el procedimiento	50
Tabla 8. Proporciones utilizadas para la elaboración de las probetas para el ataque de ácidos	52
Tabla 9. Cálculo de probetas para el ataque de ácidos	52
Tabla 10 Proporciones para las probetas de ataque de sulfatos	53
Tabla 11. Cálculo de probetas para el ataque de sulfatos	53
Tabla 12 Proporciones utilizadas para las probetas de resistencia a altas temperaturas	54
Tabla 13 Cálculo de probetas para resistencia a altas temperaturas	54
Tabla 14. Escala de tamaño de grano de Udden-Wentworth	72
Tabla 15. Análisis granulométrico por tamizado de la arena	74
Tabla 16. Cálculos para determinar el peso específico y la absorción de agregados finos.	76
Tabla 17. Valor de azul de metileno y el comportamiento esperado de la arena.	77
Tabla 18. Promedio aritmético de la resistencia a la compresión (MPa) de las diferentes mezclas	79
Tabla 19. Comparación de resistencias a compresión expresada en (%)	80
Tabla 20 .Resistencia a la compresión para probetas con Puzolana	81

Tabla 21. Resistencia a la compresión para probetas con granito y ladrillo	81
Tabla 22. Promedio aritmético de la resistencia a la compresión por ataques con sulfatos de magnesio de las diferentes mezclas	82
Tabla 23. Valores de resistencia a la compresión por ataque con sulfatos de magnesio a los 28 días.	83
Tabla 24. Valores de resistencia a la compresión a los 28 días.	83
Tabla 25. Porcentajes de la pérdida de resistencia a la compresión por el ataque con MgSO ₄ .	83
Tabla 26. Ataques con sulfatos para probetas con PuzolanaAtaque con MgSO ₄ .	85
Tabla 27. Ataques con sulfatos para probetas con granito y ladrillo	85
Tabla 28. Promedio de la resistencia a la compresión de las diferentes probetas sometidas a ataque con H ₂ SO ₄ .	86
Tabla 29. Porcentajes de la pérdida de resistencia a la compresión por el ataque con MgSO ₄ .	86
Tabla 30. Ataque con ácidos para probetas de puzolana	88
Tabla 31. Ataque con ácidos para probetas de granito y ladrillo	89
Tabla 32. Promedio de la resistencia a la compresión de las diferentes	89
Tabla 33. Porcentajes de pérdida de peso de las probetas por altas temperaturas	90
Tabla 34. Ataques con altas temperaturas para probetas de puzolana	91

RESUMEN

TÍTULO: Evolucion mineralogica y textural de residuos de construccion y demolicion en la preparacion de geopolimeros: resistencia mecanica, desempeño y durabilidad*

AUTORES: Fabio Augusto Gómez Navas**
Eliana Padilla Serrano

PALABRAS CLAVES:

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de investigación efectuó la preparación de geopolimeros con diferentes formulaciones, realizando una caracterización física, química y mineralógica tanto del material de partida como del material obtenido comparándolo con las propiedades mecánicas del cemento tradicional mediante diferentes análisis y técnicas como la difracción de rayos X, análisis de fluorescencia y petrografía del hormigón. Se trabajaron tres tipos de materiales el cemento tradicional, sustituyendo el 25 y 50 % de residuo de demolición como sustitutos del cemento portland a dos temperaturas ambiente y 80 °C, elaborando 320 probetas.

De acuerdo a los resultados este RCD, corresponde a un conglomerado polimictico, con una matriz de material sericítico y calcáreo con abundantes fragmentos de cuarzo y roca de los tres tipos. Según FRX, la mayoría de los componentes son silicio y aluminio. Los mejores resultados se obtuvieron cuando se aumentó la temperatura a 80 °C. Estos cementos debido a la resistencia obtenida pueden ser usados en obras de urbanismo que requieren 42,5 MPa.

Del análisis elemental por FRX se puede observar que la gran cantidad determinada de Silicio (Si) y Aluminio (Al) en el residuo de concreto se encuentra en parte presente en las fases cristalinas: cuarzo y plagioclasa, principalmente. La naturaleza silicatada del residuo de concreto es justificada en la absoluta predominancia del compuesto SiO_2 (78,5% en la matriz y 91,5-97,8% en los agregados). El contenido de Al_2O_3 varía de 12,5% en la matriz a 1,9-4,1% en los agregados.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Ríos, Geólogo PhD. Codirector: Oscar Mauricio Castellanos Alarcón, Geólogo MSc

ABSTRACT

TITLE: Evolution mineralogical and textural construcción y demolition waste in the preparation geopolymers: strength, performance and durability

AUTHORS: Fabio Augusto Gómez Navas**
Eliana Serrano Padilla

KEYWORDS:

DESCRIPTION:

This research work carried out the preparation of geopolymers with different formulations , performing a physical, chemical and mineralogical starting material so the material obtained as compared with the traditional mechanical properties of concrete by means of different techniques such as analysis and X-ray diffraction , fluorescent and petrographic analysis of the concrete. Three types of materials were worked traditional concrete replacing 25 and 50 % of demolition waste as portland cement substitutes two ambient temperatures and 80 ° C , producing 320 samples .

According to the results this RCD , corresponds to a polymictic conglomerate with a matrix of calcareous material sericítico and abundant quartz and rock fragments of all three types. According FRX , most components are silicon and aluminum. The best results were obtained when the temperature was increased to 80 ° C. These cements due to the resistance obtained can be used in urban works requiring 42.5 MPa.

Elemental analysis by XRF can be seen that given the large amount of silicon (Si) and aluminum (Al) in the waste concrete is in part present in the crystalline phases : quartz and plagioclase , mostly . The nature of the residue silicate concrete is justified in the absolute prevalence of compound SiO₂ (78.5% in the matrix and from 91.5 to 97.8 % in the aggregate). Al₂O₃ content varies from 12.5% in the matrix of from 1.9 to 4.1 % in the aggregate.

* Work degree

** Physicochemical Faculty of Engineering. School of Geology. Director: Carlos Rios, PhD Geologist. Co-Director: Oscar Mauricio Castellanos Alarcón, Geologist MSc

INTRODUCCION

La industria de la construcción requiere actualmente considerables cantidades de materiales inertes (tales como grava y arena) para la elaboración de concretos, que son generalmente suministrados por sedimentos aluviales. La directa extracción de sedimentos de los ríos modifica tanto sus perfiles como su equilibrio, induciendo además problemas ambientales, y, en consecuencia, esta actividad requiere de licencia ambiental para su desarrollo. La explotación de canteras de materiales inertes de las formaciones rocosas también causa impactos ambientales que deben ser manejados ya que altera el paisaje y potencializa problemas de estabilidad. Por otra parte, otro grave problema ambiental es la disposición de residuos de construcción y demolición (RCD). La disposición incontrolada contribuye también en la degradación del medio ambiente, contribuyendo en inundaciones y proliferación de vectores nocivos para la salud. Por estas razones, la legislación a nivel mundial está promoviendo el reciclaje de RCD debido al continuo proceso de remodelación urbana, como parte de las políticas de protección del medio ambiente y de gestión de residuos. El propósito del presente estudio es evaluar la posibilidad de reciclar RCD mediante la elaboración de mezclas de estos con polímeros inorgánicos (geopolímeros). La geopolimerización es una manera viable para usarlos en la industria de la construcción y reutilizar a los RCD dando lugar a materiales con elevadas resistencias mecánicas, alta inercia química, como agregado que permite encapsular otros residuos peligrosos; adicionalmente su producción disminuye la emisión de CO₂.

Este trabajo tiene como propósito llevar a cabo una caracterización de los residuos de construcción y demolición como agregados en la preparación de concretos con geopolimeros, evaluando su resistencia mecánica, desempeño y durabilidad, similares a los que se obtendrían con cemento Portland.

PLANTEAMIENTO

La industria de la construcción demanda grandes volúmenes de concretos y es la mayor productora de RCD, sin embargo estos no se aprovechan adecuadamente. El fin de este trabajo es demostrar que es posible utilizar estos residuos en el ciclo de vida de la construcción, y para ello se propone la preparación de concretos con geopolimeros a partir de residuos de concreto como material alternativo en la síntesis de geopolimeros, a demás estudiar la evolución mineralógica y textural, buscando mejorar el desempeño físico mecánico.

El sector de la construcción necesita nuevos tipos de productos que sean al menos lo suficientemente buenos como los cementos rutinarios.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Llevar a cabo la caracterización de los concretos elaborados con RCD y geopolimeros evaluando su resistencia mecánica, desempeño y durabilidad.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Efectuar la preparación de concretos geopolimericos con diferentes formulaciones según la normatividad de las Normas Técnicas Colombianas (NTC).
- Caracterizar mineralógicamente los RCD mediante el análisis de secciones delgadas del residuo de demolición
- Caracterizar física, química y mineralógicamente los concretos elaborados con geopolimeros, tanto el material de partida como el material obtenido y compararlo con las propiedades mecánicas del cemento tradicional.
- Estudiar los concretos elaborados con geopolimeros mediante el análisis petrográfico combinado con otras técnicas analíticas (difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X)
- Evaluar la resistencia mecánica, desempeño y durabilidad de los concretos elaborados con RCD ante condiciones extremas.

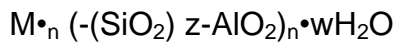
2. MARCO TEORICO

2.1. GEOPOLIMEROS

2.1.1 Definición. Los geopolímeros son materiales cementantes compuestos de grupos mineralógicos alumino-silicatados activados alcalinamente por soluciones básicas, a condiciones de temperatura y presión constantes. Si bien es cierto que el término ya había sido empleado por la antigua Unión Soviética en los años '50, se atribuye como promotor de este concepto a Joseph Davidovits, en los comienzos de los años '80, para designar a aquellos polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización Davidovits, (1993). Los geopolímeros tienen un enorme potencial de ser usados en diferentes campos, pero son aplicados en la actualidad como sustitutos del cemento portland convencional. Existen varias razones que explican la consolidación de los geopolímeros en los últimos tiempos como materiales cementantes alternativos, entre las que se encuentran las bajas emisiones de CO₂ en su producción, y las grandes resistencias mecánicas, químicas y térmicas Davidovits, (1988).

2.1.2. Estructura química y propiedades de los geopolímeros. Según Davidovits (1993), en Van Jaarsveld et al. (2007), el proceso de geopolimerización es llevado a cabo al entrar en contacto un aluminosilicato con la solución activadora alcalina, dando como resultado la formación de cadenas poliméricas tras haberse dado una reorientación de iones en solución; proceso que se describe en detalle a continuación: las cadenas poliméricas pueden ser consideradas hipotéticamente como el resultado de la policondensación de iones de ortosialato. Dado que el mecanismo exacto de reacción aún no ha sido determinado completamente, se asume usualmente que la síntesis es llevada a cabo por medio de oligómeros, los cuales proveen las estructuras unitarias de la

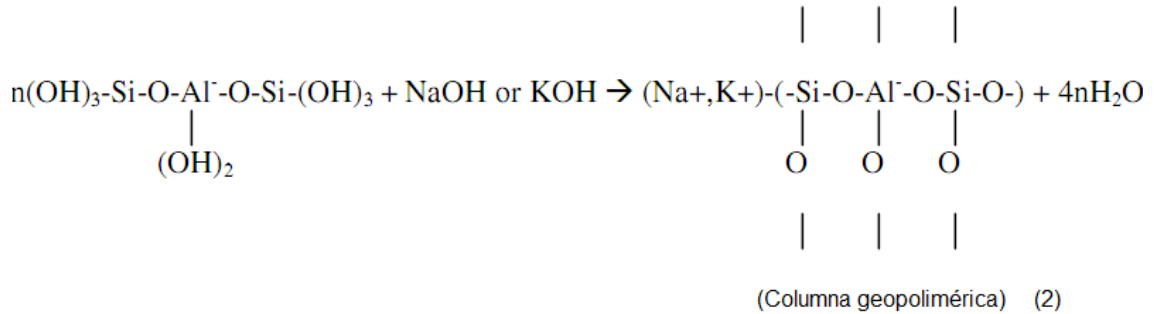
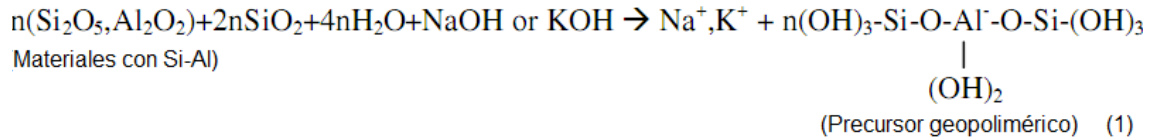
red macromolecular tridimensional. Los geopolímeros que están basados en aluminosilicatos son llamados polisialatos. Este término es una abreviación de poli-(silico-oxo-aluminato) o $(-\text{Si-O-Al-O-})_n$, siendo n el grado de polimerización. La red sialato consiste en tetraedros de SiO_4 y AlO_4 unidos 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 esta determina por la siguiente expresión:



En 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, si z vale 2, la red será poli (sialato-siloxo) y si z vale 3, la red será poli (sialato-disiloxo); y w es el número de moléculas de agua asociadas.

2.1.3. Reacción de geopolimerización. El proceso geopolimérico involucra reacciones químicas bajo condiciones altamente alcalinas de los materiales de partida ricos en Al y Si, produciendo enlaces poliméricos del tipo Si-O-Al-O Davidovits (1993), lo cual puede representarse esquemáticamente de la siguiente manera:

Figura 1. Esquema de formación del material geopolimérico descrito por Davidovits (1993) en Van Jaarsveld et al. (2007).



Con base en un modelo de reacción propuesto por varios autores (Davidovits, 1993; Xu and Van Deventer, 2000), las reacciones en la geopolimerización se pueden dividir en tres etapas mecánicas: disolución/hidrólisis; reestructuración; y policondensación/gelatinización. Estos tres mecanismos pueden ocurrir simultáneamente y son reversibles en cierta medida. La cinética de cada una de estas etapas varía según el tipo de aluminosilicato, la relación sólido solución, la concentración de silicato alcalino, el contenido de agua y la condición de reacción.

De acuerdo a Beleñaet al. (2003), la activación alcalina en condiciones de presión y temperatura próximas a las ambientales de algunas arcillas calcinadas da lugar a materiales cementantes de altas prestaciones mecánicas. Se observa como el método de curado-secado a temperatura ambiente produce resistencias superiores, posiblemente debido a que la deshidratación y deshidroxilación a 40°C sea demasiado rápida ocasionando la formación de microfisuras en las piezas.

2.1.4. Efecto del silicato soluble. Según (Palomo et al, 1999) la cinética y el mecanismo de geopolimerización son en gran medida afectados por al menos tres factores 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., 1999). Xu y Van Deventer (2000) observaron 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 silicato de sodio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{XSiO}_2$) es producido por la fusión de arenas de sílice y carbonato de soda en diferentes proporciones a temperaturas que superan los 1000 °C. Los cristales de silicato de sodio se pueden producir por la fusión directa de mezclas muy precisas de arenas de sílice pura (SiO_2) y carbonato de soda (Na_2CO_3) en hornos de combustión de gas, crudo o eléctricos con temperaturas superiores a los 1000 °C. La reacción que se presenta en estos hornos es la siguiente

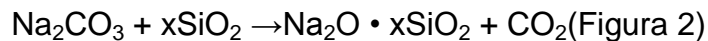


Figura 2. Proceso de producción del silicato de sodio.



Tomado de www.synsa.com

2.1.5. Efecto de los cationes (Na,K,Ca). De acuerdo con McCormick and Bell (1989), 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 grandes de aluminosilicato. El comportamiento similar de los cationes de metales alcalinos se observa también en la geopolimerización. Van Jaarsveld (1999) demostró que el grado de disolución de aluminio y los precursores de silicio es mayor en geopolímeros basados en Na que los basados en K. Sin embargo, el grado de formación de gel en geopolímeros a base de K es más alto que los geopolímeros basados en Na.

2.1.6. Efecto de la temperatura de curado y del tiempo de envejecimiento.

Utilizando métodos calorimétricos para examinar la activación alcalina de metacaolinita con Ca(OH)₂ a 35, 45 y 60 °C Alonso y Palomo (2001), atribuyeron las curvas de calorimetría a la disolución, a la precipitación de fases de aluminosilicato amorfo y a la formación de fases zeolíticas. Ellos también observaron que el aumento en la temperatura de curado da lugar al aumento del índice de reacción. La misma tendencia se aplica a los geopolímeros a base de

cenizas volantes, el cual a altas temperaturas de curado, tanto la disolución como la policondensación son aceleradas (Bakharev, 2005; Palomo et al, 2008. La formación de fases zeolíticas, tales como hidroxisodalita y chabazita, son también observadas en las cenizas volantes activadas con soluciones alcalinas a altas temperaturas Bakharev, (2005).

Van Jaarsveld et al. (2002) encontró que geopolímeros sintetizados de una mezcla de caolinita y cenizas volantes reportaron que a prolongadas altas temperaturas de curado (70-80 °C) se produce un decrecimiento del esfuerzo mecánico debido a la evaporación de agua de poros y a la desintegración de gel geopolimérico.

2.1.7 Influencia a ataques de sulfatos. Bakharev, (2004) expuso muestras de geopolímeros en soluciones sulfatadas, que no mostraron signos visible de deterioro. Luego de meses de inmersión en soluciones al 5 % de sulfato de sodio y magnesio, la superficie de las muestras no mostraron ninguna marca. Sin embargo presentaron pérdida en peso después de cinco meses de inmersión con valores que oscilan entre 1.4 y 9.1 gramos.

2.1.8. Historia y aplicaciones de los geopolímeros. La implementación de los materiales cementantes alternativos tienen como objetivo la investigación y comercialización de sustitutos competentes al cemento portland convencional.

En un comienzo, los geopolímeros fueron preparados mediante la mezcla de minerales derivados de algunas arcillas. Las caolinitas eran utilizadas en las síntesis geopoliméricas con el uso de soluciones alcalinas de NaOH y KOH en grados variables de concentración molar, a temperaturas comprendidas entre los rangos de 25 a 120 °C. Con el fin de lograr una mayor reactividad, las caolinitas eran artificialmente convertidas a metacaolinitas a través de un proceso de calcinación de 650°C durante algunas horas Davidovits (1999). Las metacaolinitas resultantes tenían un alto contenido de aluminosilicatos amorfos y partículas de

tamaño más pequeñas (desde el punto de vista textural), lo que se traducía en una mayor reactividad al contacto con la solución alcalina. En la actualidad, algunos geopolímeros a base de metacaolinita han sido encontrados con propiedades mecánicas superiores (resistencia a la compresión y al fuego), en comparación con cualquier otro tipo de ligante orgánico. Los materiales geopoliméricos pueden ser formados rápidamente a bajas temperaturas, en tiempos de unas pocas horas a 30°C, unos pocos minutos a 85°C, o inclusive unos pocos segundos en un horno de microondas (Davidovits, 1993). Se ha podido establecer experimentalmente resistencias a la compresión del orden de 60 MPa, después de un solo día de curado, llegando incluso a 100 MPa. Térmicamente estos materiales son estables a altas temperaturas (1000-1200°C), en donde cualquier otro tipo de resina orgánica o cemento no podría serlo (Davidovits, 1993, 1994). Estos hallazgos han servido para que los geopolímeros se hayan hecho camino de forma progresiva en las industrias de la cerámica, de los materiales de revestimiento refractario y de materiales para la construcción.

Teóricamente, cualquier materia prima de naturaleza aluminosilicatada puede ser usada en la preparación de geopolímeros (Xu and Van Deventer, 2002). Varios autores han utilizado diferentes residuos como fuente alternativa de materias primas, como las cenizas volantes (Fernández-Jiménez et al., 2007; Palomo et al., 2008), escorias de alto horno (Cheng, 2003) y residuos de la minería de tungsteno (Pacheco, et al., 2008). Sin embargo, en un estudio reciente, Lampris et al. (2009) llevaron a cabo la preparación de geopolímeros a partir de RCD.

El uso de estos residuos industriales ha producido de forma económica y eficiente, geopolímeros de alta calidad, los cuales contribuyen con el medio ambiente por lo menos en dos perspectivas: (1) promueve la reducción de la producción de cementos convencionales y por lo tanto la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y (2) proporciona una tecnología

alternativa para el tratamiento de residuos y encapsulación de desechos tóxicos (Khale and Chaudhary, 2007; Palomo et al., 2008; Van Jaarsveld et al., 2002).

2.2. CEMENTO

2.2.1. Definición. De acuerdo a la Norma ICONTEC 31, el cemento es un material pulverizado que además de óxido de calcio contiene sílice, alúmina y óxido de hierro y que forma, por adición de una cantidad apropiada de agua, una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire. Se excluyen las cales hidráulicas, las cales aéreas y los yesos.

El cemento portland ha sido definido por la ASTM, especificación 150 - 81 como el producto obtenido por la pulverización de la escoria consistente, esencialmente de silicatos hidráulicos de calcio que por lo general, contienen una o más formas de sulfato de calcio como adición interna de molienda.

De acuerdo a Corcino, 2007, el cemento Portland es un aglomerante hidráulico ya que en combinación con el agua puede desarrollar propiedades, es un producto comercial de fácil adquisición el cual se mezcla con agua, ya sea solo o en combinación con arena, piedra u otros materiales similares, tiene la propiedad de combinarse lentamente con el agua hasta formar una masa endurecida.

El conocimiento bastante extenso sobre el cemento en cuanto a composición, características y comportamiento permite fabricar cementos con propiedades específicas.

La clasificación más usada se encuentra en la norma ICONTEC 30, basada en las normas ASTM.

La clasificación es la siguiente:

Cemento Portland tipo 1. Es destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades específicas. Su resistencia es de 42,5 MPa a los 28 días.

Cemento Portland tipo 1M. Alcanza resistencias superiores a las del tipo 1.

Cemento Portland tipo 2. Es resistente a la acción moderada de sulfatos y el desprendimiento de calor es menor que en los cementos normales.

Cemento Portland tipo 3. Alcanza alta resistencia a edades tempranas

Cemento Portland tipo 4. El desprendimiento de calor es bajo.

Cemento Portland tipo 5. Ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.

Cemento Portland Blanco. Se elabora con materias primas seleccionadas que no contienen óxido de hierro, por eso la coloración. Se usa para decoración.

Las características nombradas en cada tipo de cemento se obtienen variando las proporciones de los compuestos en el clinker y esto se logra partiendo de la dosificación de las materias primas.

A la mayoría de los cementos portland se les adiciona otras sustancias con fines generalmente económicos. Los materiales adicionados pueden ser calizas, escorias de alto horno o puzolanas.

Agregar calizas al clinker no es conveniente porque reduce la resistencia a la compresión del cemento, aunque ofrece mayor plasticidad durante el proceso inicial de reacción con el agua.

A los cementos que se les adiciona escorias se les llama cemento siderúrgico tipo 5. El uso de ellos se recomienda en obras de concreto, donde se requiere alta resistencia al ataque químico, bajo calor de hidratación y resistencias iniciales no altas. Es el cemento ideal para obras sumergidas en aguas marinas o en contacto con aguas sulfatadas y también para estructuras de concreto de gran masa, por presentar baja variación de volumen y por consiguiente menor riesgo de fisuración y agrietamiento.

A los cementos con adición de puzolanas se les llama Cemento Portland Puzolanicos .Las puzolanas al igual que las escorias son resistentes a los sulfatos y desprenden bajo calor de hidratación; la reacción de hidratación es lenta.

Tanto las puzolanas como las escorias contienen sílice en forma reactiva; estos materiales finamente divididos y en presencia de agua reaccionan con el hidróxido de calcio desprendido en la hidratación del cemento, formando compuestos con propiedades cementantes de características similares al cemento portland.

Las resistencias alcanzadas con los cementos siderúrgicos y puzolanicos son tardías con respecto a las obtenidas con los cementos portland.

2.2.2. Propiedades físicas y mecánicas del cemento Portland. Las propiedades físicas y mecánicas del cemento portland se miden mediante ensayos realizados en el cemento puro, en la pasta o en el mortero y muestran la calidad del cemento si se comparan los resultados con las especificaciones de la norma ICONTEC 121.

PESO ESPECÍFICO

La densidad o peso específico se define como la relación de peso a volumen; su valor varía entre 3.08 a 3.20 gr/cm³ para el cemento portland tipo 1, pero el cemento que tiene adiciones tiene un peso específico menor porque el contenido de clinker es menor.

El peso específico del cemento no indica la calidad del cemento, pero se emplea en el diseño y control de mezclas de concreto; sin embargo un peso específico bajo y una finura alta indican que el cemento tiene adiciones.

La norma ICONTEC 221 Indica el procedimiento para determinar el peso específico del cemento.

FINURA

La finura del cemento es una de las propiedades físicas más importantes del cemento, ya que está directamente relacionada con la hidratación del mismo.

La hidratación de los granos de cemento ocurre del exterior hacia el interior; luego el área superficial de la partícula de cemento constituye el material de hidratación, y el tamaño de los granos (su finura) tiene gran influencia en la velocidad de hidratación, en el desarrollo de calor, en la refracción y en el aumento de resistencia con la edad.

Cuando el cemento es muy fino endurece más rápido y por tanto desarrolla alta resistencia en menor tiempo; sin embargo libera mayor cantidad de calor y por ende aumenta la retracción y la susceptibilidad a la fisuración, además una molienda fina aumenta los costos de producción y hace que el cemento sea susceptible a hidratarse con la humedad ambiental, por lo que su vida útil es más corta.

Un grano fino exuda menos que un grano grueso porque retiene mejor el agua al tener mayor superficie de hidratación.

La finura se expresa por el área superficial de las partículas contenidas en un grano de cemento y se llama superficie específica; se mide en cm^2/gr .

En el laboratorio la finura se puede medir de dos maneras:

Por tamizados en tamices No100 (149) y No 200 (79) siguiendo la norma ICONTEC No 226

La finura se mide en el laboratorio mediante el aparato de permeabilidad al aire de Blaine, siguiendo la norma ICONTEC No 33. El método consiste en determinar la permeabilidad del aire de una capa de cemento y se basa en el hecho de que la cantidad y el tamaño de los poros de una muestra de determinada densidad son funciones del tamaño de las partículas y de su distribución granulométricas.

2.3. RESIDUOS DE CONSTRUCCION Y DEMOLICION (RCD)

2.3.1. Definición. De acuerdo a Alegre et al, 2007, se define como residuos de construcción y demolición (RCD's) todos los desechos que se generan de las variadas actividades de construcción y de demolición. Estos residuos incluyen varios materiales inertes y reactivos, que resultan de la demolición no discriminatoria de estructuras.

2.3.2. Volumen. En la Comunidad Europea se producen entre 190 y 200 millones de toneladas anuales de residuos en forma de desechos de construcción y de escombros de demolición, lo que supone unos 550 Kg / habitante / año. Esta cifra es superior a la cantidad de basura producida por un hogar en un año.

Los residuos provenientes de estas fuentes representan aproximadamente entre el diez y el treinta por ciento en peso del total de los desechos sólidos urbanos, incrementándose estos porcentajes cuando se producen desastres naturales. Moral, F. J. (2003).

Estudios dirigidos por Lauritzen et al, 1992 estiman de 500 a 1000 Kg. Por año el total de producción de residuos de construcción y demolición generados en la mayoría de los países desarrollados. Esto significa que en los próximos años estos volúmenes irán aumentando. En su gran mayoría estos materiales corresponden a concreto, caliza, arenisca, metal y madera, dependiendo de tipo de construcción. Bossink and Brouwers, 1996.

VOLUMEN DE ESCOMBROS EN BOGOTA Y BUCARAMANGA

De acuerdo a cifras de la ANDI en el primer congreso de reciclaje realizado en Colombia en 2012, en Bogotá y Cundinamarca existen 16 escombreras autorizadas pero solo 2 tienen un PMA (Plan de Manejo Ambiental), también se señala que en Bogotá género en el 2011 cerca de 12 Millones de m³ de

escombros. En dicho congreso la empresa CEMEX Colombia indicó que el volumen de escombros en Bogotá, prácticamente se duplicó en 10 años, si tenemos en cuenta que para el año 2000 el volumen de escombros era de 2 millones de m³. En la ciudad capital se generan 4 toneladas de escombros por cada tonelada de RSU (Residuos Sólidos Urbanos).

En Santander, según el grupo de infraestructura de la subdirección de seguimiento y control ambiental de la CDMB están autorizadas tres escombreras:

Tabla 1 Escombreras autorizadas por la CDMB

ESCOMBRERA	UBICACION	RESOLUCION
Rancho Grande	Vereda de los Llanitos sobre la vía Piedecuesta Curos al lado del antiguo INTRA	RE – 002 – 2009 Autorizada para escombros
El Parque	Km. 4 – Autopista Girón Antigua Ladrillera Bucaramanga	RE – 001- 2008 Autorizada para escombros
Cauchos	Margen derecha de la vía Piedecuesta San Gil aproximadamente un Km de la antigua caseta.	RA – 001124- 2012 Solo para material de corte y de excavación

Fuente: CDMB

De igual forma la autoridad ambiental señala la normativa que se exige actualmente para el control y seguimiento que se hace a las escombreras de acuerdo a reportes bimensuales que estas presentan a la CDMB donde presentan evidencias de la disposición que hacen de los RCD.

Tabla 2 Normatividad para seguimiento y control de Escombreras

Numero de resolución	ENTIDAD	Tópico
Resolución 1273 de 2011	CDMB	Movimiento de tierra
Resolución 541 de 1994	Ministerio de Ambiente	Manejo de escombros

Fuente: CDMB

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1 MATERIALES, EQUIPOS Y SUMINISTROS

Con el fin de llevar a cabo la preparación de mezclas experimentales requeridas en las pruebas de laboratorio se utilizó los siguientes materiales:

Residuo de demolición proveniente del andén derribado para la construcción del proyecto de vivienda Colina de Versailles de Floridablanca

Arena silíceo estándar (según la norma NTC 220),

Cemento Portland Tipo I, marca Holcim,

Hidróxido de sodio del 98% de pureza en pellets

Silicato de sodio neutro 42

Los equipos utilizados en la preparación de concretos elaborados congeopoliméros incluyen:

Molino de bolas

Espátula;

Trituradora de mandíbula;

Mortero de ágata;

Equipo de tamizado

Juego de tamices

Probetas graduadas

Balanza digital;

Envases;

Mezcladora;

Moldes

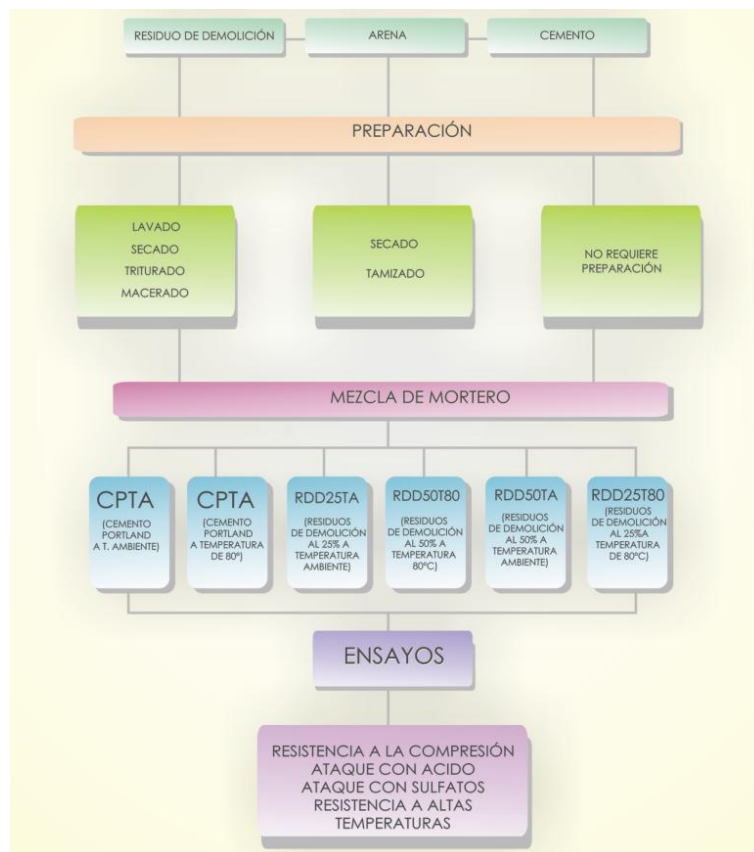
Compactador de madera

Mufla
Estufa
Prensa hidráulica

3.2 METODOLOGÍA

3.2.1 Desarrollo experimental. Con el fin de cumplir con los objetivos planteados se presenta a continuación en forma esquemática el desarrollo experimental realizado en la investigación (Figura 3), en el cual se incluye el procedimiento de preparación, las técnicas de caracterización y las pruebas físicas aplicadas a cada uno de los morteros.

Figura 3: Representación esquemática del desarrollo experimental



3.2.2. Preparación de los materiales

3.2.2.1. Residuo de demolición: El Residuo de demolición fue obtenido de un andén de aproximadamente 15 años de edad que fue derribado para el desarrollo del proyecto de vivienda denominado “Colina de Versalles” ubicado en la calle 197 No. 15-382 del municipio de Floridablanca (Santander).

Inicialmente el residuo de demolición (figura 4a) fue llevado al Laboratorio de trituración, molienda y clasificación de materiales de la Escuela de Geología UIS, donde se lavó y se limpió para quitar residuos de barro y arena que se encontraban adheridos a este. Posteriormente el material fue expuesto al sol para ser secado durante 4 días sin alterar sus propiedades físicas.

Para reducir el tamaño del material se utilizó una trituradora de mandíbulas RETSCH BB 200 (figura 4b). Luego de este triturado primario se llevó a la Planta de Aceros de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales UIS, donde se pulverizó empleando el molino de bolas marca DENVER modelo C630 utilizando porciones de 2 kilos, durante 90 minutos, con el fin de obtener un polvo de tamaño similar al del cemento Portland. Luego se procedió a tamizar el material hasta obtener un tamaño de grano inferior a $125 \mu\text{m}$ (figura 4c).

3.2.2.2. Arena: La arena silíceo estándar (figura 4d) utilizada fue extraída del Río Lebrija en el corregimiento de Bocas ubicado en la localidad de Ríonegro, Santander. El análisis de la arena se realizó en el Laboratorio de Caracterización de materiales de construcción de la Escuela de Ingeniería Civil UIS de acuerdo a lo exigido por la norma NTC 220 para la Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado). Una parte de esta se extendió sobre el suelo y se sometió a un proceso de secado durante dos días.

Figura 4. Equipos y materiales utilizados en la preparación de los materiales. (a) Residuo de demolición. (b) Trituradora de mandíbula. (c) Material triturado y tamizado. (d) Arena. (e) Cemento. (f) Solución activante.



3.2.2.3. Cemento: El cemento de referencia es el Cemento Portland Tipo I, marca Holcim, el cual es un producto amparado por el sello de conformidad norma Icontec NTC 121/321 para cementos Tipo I.

3.2.2.4. Hidróxido de sodio (Soda caustica): En la Tabla 3 se presentan las especificaciones técnicas del hidróxido de sodio del 98% de pureza en pellets

Tabla 3 Especificaciones técnicas del NaOH

Propiedad	Especificación
Presentación	Líquido
Color	Incoloro
Olor	Inoloro
pH	14
Peso molecular	NaOH40g/mol
Densidad	2,13 g/cm ³

Fuente: www.cisproquim.com

3.2.2.5. Silicato de sodio neutro 42: La Tabla 4 presenta las especificaciones técnicas del Silicato de sodio neutro 42

Tabla 4 Especificaciones técnicas del silicato de sodio neutro 42

Propiedad	Especificación
Presentación	Líquido
Color	Incoloro
textura	Fluida
Densidad (20 °C)	40,0 - 42,0
Gravedad. Específica	1,381 - 1,408
Alcalinidad (% Na ₂ O)	8,74 - 9,74
Contenido de Sílice (%SiO ₂)	26,22 - 30,56
% de Sólidos Totales	36,1 - 40,1
Relación de totales Na ₂ O SiO ₂	1:3,00 - 1:3,1

Fuente www.asiquim.com

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DE PARTIDA

3.3.1. Metodología. Previo a la realización de la síntesis de geopolímeros fue necesario realizar una caracterización mineralógica y geoquímica de los materiales a ser utilizados. Esta fase comprendió el análisis macroscópico y microscópico del residuo de demolición, la granulometría de la arena, la densidad y la absorción y el módulo de finura del cemento y residuo de demolición, la presencia de material orgánico (azul de metileno) en la arena, así como el uso de técnicas analíticas tales como análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) y análisis de difracción de rayos X (DRX).

3.3.1.1. Análisis granulométrico de la arena: La granulometría de una base de agregados se define como la distribución del tamaño de sus partículas. Esta granulometría se determina haciendo pasar una muestra representativa de agregados por una serie de tamices ordenados, por abertura, de mayor a menor. Los tamices son básicamente unas mallas de aberturas cuadradas, que se encuentran estandarizadas por la Norma Técnica Colombiana # 32. La serie de tamices que se emplean para clasificar agregados para concreto se ha establecido de manera que la abertura de cualquier tamiz sea aproximadamente la mitad de la abertura del tamiz inmediatamente superior, o sea, que cumplan con la relación 1 a 2.

MATERIAL Y EQUIPOS

Balanza. Una balanza o báscula con precisión dentro del 0.1% de la carga de ensayo en cualquier punto dentro del rango de uso, graduada como mínimo a 0,05 kg. El rango de uso de la balanza es la diferencia entre las masas del molde lleno y vacío. Serie de Tamices. Son una serie de tazas esmaltadas a través de las cuales se hace pasar una muestra de agregado que sea fino o grueso, su orden es de mayor a menor. En su orden se utilizarán los siguientes tamices: tamiz 1½". 1", ¾". ½", # 4 Fondo para el Agregado Grueso; el tamiz # 4, # 8, # 16, # 30, # 50, # 100, # 200 y fondo para el Agregado Fino.

Este ensayo tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de arena, el cual consistió en separar las partículas en sus diferentes tamaños utilizando tamices en orden decreciente, inicialmente se tomó la fracción granular, se pesó en la balanza y luego se llevó a cabo el tamizado para separar las diferentes partículas 1.18 mm, 0.6 mm, 0.425 mm, 0.25 mm, 0.15 mm, comenzando en orden decreciente, teniendo en cuenta de no mezclar las partículas tamizadas, finalmente se determinó el peso de cada fracción retenida,

verificando que la suma de los pesos retenidos en cada tamiz diera igual al peso de la fracción granular inicial, con una tolerancia del 0.5%.

3.3.1.2. Análisis Mineralógico por Difracción de rayos. El análisis de DRX del residuo de demolición se llevó a cabo en el Laboratorio de rayos-X de la Unidad de Caracterización y Estructura de Materiales del Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas de Maracaibo (Venezuela). La muestra fue montada en porta muestras de aluminio mediante la técnica de llenado lateral. La toma de datos de difracción se realizó en un difractómetro Philips PW1710, operando en geometría Bragg–Brentano con radiación $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$); voltaje 40 KV; amperaje 40 mA; rango de medición $2\text{--}50^\circ$ (2θ); tiempo de muestro / paso 0.4 s; Intervalo de muestreo 0.02° (2θ); monocromador de grafito; rendijas DS 1° , RS 0.3 mm, SS 1° . La identificación de fases se llevó a cabo mediante la comparación de los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

3.3.1.3. Determinación del peso específico. Los materiales y equipos utilizados para este ensayo incluyen Frasco de Le Chatelier; Balanza electrónica; Recipiente para baño de maría; Termómetro; Residuo de demolición; Kerosene; Hielo.

Procedimiento experimental

Se llenó un frasco con Kerosene hasta un punto entre 0 y 1 ml asegurándose de que quedó seco en el interior por encima de este nivel, esta lectura fué L0 (lectura Inicial).

Luego, se agregó 64 gramos de Cemento Portland tipo I en pequeñas cantidades, teniendo cuidado de no derramar el líquido ni untar las paredes por encima del nivel. Se colocó el frasco en baño de María, adicionando hielo para alcanzar la temperatura inicial. Por último, se tomó la lectura final Lf.

3.3.1.4. Determinación del módulo de finura: La determinación del módulo de finura se llevó a cabo siguiendo el método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico (Norma Técnica Colombiana ICONTEC 226 para el sector de la construcción). Se tomaron 100 gr del residuo de demolición, se tamizó con tapa, se retiró el fondo para pesar el material que pasó el tamiz 200.

3.3.1.5. Presencia de materia orgánica (Azul de metileno): La cantidad de materia orgánica se determinó por medio del valor azul de metileno en agregados finos según la norma INVE 235-07. Este ensayo tiene por objeto determinar la presencia de materia orgánica y/o arcillas dañinas en la arena, la solución de azul de metileno es titulada en pequeños incrementos en un recipiente que contiene agua destilada y la muestra de material menor del tamiz de 75 μm (malla 200). Después de cada incremento se retira del recipiente una pequeña cantidad del agua con la muestra, empleando una varilla agitadora de vidrio y se deja caer en forma de gota sobre el papel filtro. Cuando la muestra de agregado no pueda absorber más azul de metileno se forma un anillo azul en el papel filtro. En este momento se procede a cuantificar la cantidad de solución de azul de metileno añadida y a calcular el valor de azul de metileno (mg/g miligramos de azul de metileno por gramo de muestra).

3.3.1.6. Análisis de Fluorescencia de Rayos X: Se realizó un análisis mineralógico por fluorescencia de rayos X para determinar las diferentes fases cristalinas y amorfas presentes en el material.

El análisis de FRX del residuo de demolición se realizó en el Centro de Desarrollo Productivo de Joyería de Bucaramanga, utilizando un espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersa Shimadzu EDX 800 HS con un detector de estado sólido Si (Li), fuente de Rayos X de rodio, colimador de 10 mm sin filtro. La cuantificación de los elementos se realizó empleando el método de los

Parámetros Fundamentales (FP) mediante el software DXP-700E Versión 1.00 Rel. 014.

PROCEDIMIENTO

Se realizó un análisis mineralógico por fluorescencia de rayos X para determinar las diferentes fases cristalinas y amorfas presentes en el material.

Este método utiliza la emisión fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con fuente de radiación X. De esta manera cuando la radiación fluorescente incide sobre una estructura cristalina se produce una emisión fluorescente de radiación X. Las muestras se toman del material proveniente y se realiza un barrido de radiación a determinadas longitudes de onda y diferentes diámetros de irradiación (1 y 3 mm); a medida que los electrones de los átomos presentes realizan transiciones por la excitación producen un exceso de energía, el cual se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente con una longitud de onda característica de cada átomo, donde la intensidad energética está directamente relacionada con la concentración de los elementos presentes en la muestra.

3.3.1.7. Comportamiento a altas temperaturas: La resistencia a altas temperaturas se determinó a los 28 días de curado, los análisis se realizaron en base a la pérdida de peso de las probetas y la respectiva comparación en la resistencia inicial y la final.

3.4. DISEÑO DE LA MEZCLA

A continuación se describen las proporciones utilizadas para las mezclas realizadas en el trabajo de investigación. Los ensayos de resistencia se llevaron a cabo para cada una de los siguientes morteros. La nomenclatura utilizada en las tablas será CPO= Cemento Portland y R= Residuo.

CPO- Mortero con el 100% de CPO (Cemento Portland) y R significa residuo.

CPO 75C 25R -Mortero con el 75% de CPO y 25% de residuo de concreto.

CPO 50C50R - Mortero con el 50% de CPO y 50% de residuo de concreto.

Inicialmente se realizaron 72 probetas para la resistencia a la compresión; 36 a temperatura ambiente y 36 a 80°C; con edades de 7, 14, 28 y 56 días. A continuación se describen cada uno de los morteros, así como las proporciones utilizadas en cada caso y el número de probetas elaboradas de acuerdo a cada diseño. Ver Tabla 6 Recomendación quite este párrafo de aquí puesto que adelante vuelve a decir lo mismo

3.4.1. Mortero de cemento Portland. Para la preparación del mortero de referencia se utilizó la Norma Técnica Colombiana NTC 220, donde las proporciones que se utilizaron fueron 1 parte de cemento y 2,75 partes de arena y una relación de agua-cemento de 0,485.

3.4.2. Mortero geopolimérico. Para la preparación del mortero geopolimérico, al igual que las probetas de CPO, se utilizó la norma NTC 220, pero con la sustitución de CPO por residuo de concreto y el agua por la solución activante (NaOH + NaSiO₃); las proporciones que se utilizaron fueron de 1 parte de mezcla residuo de concreto+CPO y 2,75 partes de arena y una relación de la solución activante: mezcla residuo de concreto+CPO de 0.485. La solución activante se preparó disolviendo hidróxido de sodio al 98% en pellets en agua destilada hasta que se obtuvo una concentración 8M, la cual fue mezclada con el silicato de sodio neutro 42 con relación molar SiO₂:Na₂O ≈ 3.0 (SiO₂ = 28.74%, Na₂O = 9.27%, y H₂O = 61.99% por masa); la relación hidróxido de sodio /silicato de sodio fue de 1:2,5.

Se realizaron en total 24 probetas de CPO, 24 probetas con 75% de CPO y 25% de residuo, 24 probetas con 50% de CPO y 50% de arena, de las cuales 12 fueron

para el ensayo de la resistencia a la compresión evaluadas a los 7, 14, 28 y 56 días, 12 se sumergieron en una solución de ácido sulfúrico para ser evaluados durante 1, 2, 3, 4 y 9 semanas a 300, 600 y a 1000 °C. En la Tabla 5 se presenta una matriz experimental que resumen las proporciones utilizadas para el diseño de mezclas en la preparación de los morteros de referencia y geopolimérico.

Tabla 5. Proporciones utilizadas para la elaboración de morteros para la resistencia a la compresión

Número	ARENA	CEMENTO	CEMENTO	RESIDUO	RESIDUO	CEMENTO	RESIDUO
de cubos	(g)	%	(g)	%	(g)	9 CUBOS (g)	9 CUBOS (g)
1	229,16	23,61%	83,33				
9	2062,44	100	83,33	0	0	749,9997	0
9	2062,44	75	62,4975	25	20,83250	562,4775	187,4925
9	2062,44	50	41,665	50	41,66500	374,985	374,985
TOTAL	6187,32		187,4925		62,49750	1687,462	562,4775

En total se realizaron 72 probetas, tanto para temperatura ambiente como para 80° con edades de 7, 14, 28 y 56 días. En la Tabla 6 se muestra el cálculo de probetas elaboradas para la resistencia a la compresión.

Tabla 6 Cálculo de probetas para la resistencia a la compresión

T ambiente Número de probetas	T curado 80 °C	TOTAL PROBETAS POR PRUEBA	DIAS DE CURADO	TOTAL PROBETAS PARA CUATRO PRUEBAS
3	3	6	7,14,28,56	24
3	3	6	7,14,28,56	24
3	3	6	7,14,28,56	24
				72

3.5. ELABORACIÓN DE PROBETAS

El proceso de elaboración de las probetas comprende los siguientes pasos

Figura 5. Procedimiento para la elaboración de probetas



- 1. Limpiar los moldes
- 2. Secar los moldes
- 3. Engrasar los moldes



- 4. Calcular las proporciones de la pasta de cemento
- 5. Pesar las proporciones
- 6. Homogeneizar la mezcla



- 7. Agregar agua o solución activante a la mezcla
- 8. Verter pasta de cemento al 50% de la capacidad del molde
- 9. Compactar la pasta vertida en los moldes



- 10. Retirar el exceso de pasta de los moldes
- 11. Compactar la pasta vertida en los moldes
- 12. Cubrir los moldes con plástico



- 13. Retirar las mezclas de los moldes
- 14. Marcar las probetas con los códigos respectivos

En la preparación de las probetas se siguió el procedimiento utilizado según el I.N.V.E-323-07 para la Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico.

Los equipos utilizados incluyen:

Balanza con capacidad de 2000 gr y sensibilidad de 2 gr.

Tamices de tejido de alambre con las características descritas en la tabla 5.

Probetas de vidrio con preferencia una capacidad que permita tener el agua total de mezcla en una sola operación.

Moldes, los cuales no deben tener más de tres compartimentos, ni constar de más de dos elementos separables. Deben ser fabricados de metal duro, no atacable por las mezclas de cemento. Los lados de los moldes deberán ser los suficientemente rígidos para prevenir ensanchamientos o pandeos en los especímenes. A los moldes se aplica en sus caras interiores una capa delgada de aceite mineral, eliminando el exceso de aceite en cada uno de los compartimentos.

Los cubos se dejaron 24 horas en los moldes, transcurrido este tiempo se dejaron curar durante 7, 14, 28 y 56 días en un cuarto húmedo (cámara húmeda) en donde permanecieron hasta el momento del ensayo; se procedió a realizar ensayos por triplicado de la misma mezcla para cada día de curado y sacar un promedio para cada edad.

Tabla 7 Relación de tamices utilizados en el procedimiento

Abertura	Numero de tamiz
1.18 mm	16
850 μm	20
600 μm	30
425 μm	40
300 μm	50
150 μm	100

3.5.1. Ensayos realizados a las probetas. Los ensayos a las probetas se realizaron con el fin de caracterizar las propiedades de las diferentes mezclas; y se compararon con las del mortero de referencia.

3.5.1.1. Resistencia a la compresión: La resistencia a la compresión se define como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto a una edad de 28 días y se designa con f_c expresada en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), megapascuales (MPa) o en libras por pulgada cuadrada (lb/pulg^2 o psi) (Kosmatka, 1992). Se pueden usar otras edades para las pruebas pero es importante saber la relación entre la resistencia a los 28 días y la resistencia a otras edades. La resistencia a los 7 días se estima como un 75% de la resistencia a los 28 días y las resistencias a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% mayores que las resistencias a los 28 días (Kosmatka, 2004). Los principales factores que gobiernan la resistencia del concreto son los siguientes: relación agua materiales cementantes, condiciones de curado (humedad y temperatura), edad, cantidad y características.

Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio Andina Ingeniería Ltda.

Figura 6. Equipos para medir la resistencia a la compresión



Tomado en Laboratorio Andina Ingeniería Ltda.

La compresión se mide sobre dos cubos de 50mm o 2" compactados en dos (2) capas. Los cubos son curados un día en los moldes y se desmoldaran y sumergirán en agua cal hasta su ensayo. Las proporciones en masa para formar el mortero usado están compuestas de 1 parte de cemento y 2.75 partes de arena. Para este trabajo se utilizaron sustituciones del cemento tradicional por residuo de cemento como se presenta en las tablas 2, 3, 4, 5 y 6 respectivamente.

3.5.1.2. Ataque de ácidos: El ensayo de ataque con ácidos se realizó con el fin de someter el mortero a condiciones extremas de exposición, simulando una situación de ambientes agresivos. La prueba de resistencia al ataque con ácidos se realizó sobre el material cementante (mortero geopolimérico y morteros de CPO); debido a que no existe un procedimiento estándar universalmente aceptado, el tipo y concentración de la solución acida a la cual los especímenes son expuestos puede ser variada.

Para el caso de la investigación los especímenes fueron curados durante 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 cuatro semanas se ensayaron dos cada semana de la misma mezcla para sacar un promedio y, se dejó un testigo de cada mezcla que fue evaluado a las nueve semanas de estar expuesto a la solución. El ataque

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

Tabla 8. Proporciones utilizadas para la elaboración de las probetas para el ataque de ácidos

No. de cubos	ARENA	CEMENTO	RES.	RES.	CEMENTO 9 CUBOS
	(g)	(g)	%	(g)	(g)
1	229,16	83,33			
9	2749,92	83,33	0	0	749,9997
9	2749,92	62,4975	25	20,8325	562,4775
9	2749,92	41,665	50	41,6650	374,985
TOTAL	8249,76	187,4925		62,4975	1687,4622

Tabla 9. Cálculo de probetas para el ataque de ácidos

T ambiente	T curado	TOTAL	SEMANAS	TOTAL PROBETAS
No. probetas	80 °C	PROBETAS		POR SEMANAS DE CURADO
3	3	6	1,2,3,4,9	45
3	3	6	1,2,3,4,9	45
3	3	6	1,2,3,4,9	45
				135

3.5.1.3. Ataque por sulfatos: El ataque por sulfatos se debe fundamentalmente a la interacción fisicoquímica entre los minerales de la pasta de cemento hidratada y los iones sulfato del medio. Su consecuencia es la expansión, agrietamiento, pérdida de masa y desintegración del concreto.

La resistencia del concreto a los sulfatos depende de numerosos factores, tales como la permeabilidad del concreto, el tipo (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.

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

La prueba de resistencia al ataque con sulfatos se realizó de la misma forma que el ataque con ácidos; la concentración de sulfato de magnesio fue de 50 g/L.

El ataque de sulfatos fue evaluado mediante el ensayo de resistencia de compresión y pérdida de peso.

Tabla 10 Proporciones para las probetas de ataque de sulfatos

No. de cubos	ARENA	CEMENTO	CEMENTO	RESIDUO	RESIDUO	CEMENTO9 CUBOS	RESIDUO9 CUBOS
	(g)	%	(g)	%	(g)	(g)	(g)
1	229,16	23,61%	83,33				
9	2062,4	100	83,33	0	0	749,9997	0
9	2062,4	75	62,49	25	20,8325	562,4775	187,492
9	2062,4	50	41,66	50	41,6650	374,985	374,985
TOTAL			187,49		62,4975	1687,462	562,47

Tabla 11. Cálculo de probetas para el ataque de sulfatos

T ambiente	T curado	TOTAL	SEMANAS	TOTAL PROBETAS
Número de probetas	80 °C	PROBETAS		POR SEMANAS DE CURADO
3	3	6	1,2,3,4,9	45
3	3	6	1,2,3,4,9	45
3	3	6	1,2,3,4,9	45
				135

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

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

Tabla 12 Proporciones utilizadas para las probetas de resistencia a altas temperaturas

Número de Cubos	ARENA (g)	CEMENTO (%)	CEMENTO (g)	RESIDUO (%)	RESIDUO (g)	CEMENTO 9 CUBOS (g)	RESIDUO 9 CUBOS (g)
1	229,16	23,61%	83,33				
9	2062,44	100	83,33	0	0	749,9997	0
9	2062,44	75	62,4975	25	20,8325	562,4775	187,4925
9	2062,44	50	41,665	50	41,665	374,985	374,985
TOTAL			187,4925		62,4975	1687,4622	562,4775

Tabla 13 Cálculo de probetas para resistencia a altas temperaturas

T ambiente	T curado	TOTAL	TEMPERATURAS	TOTAL PROBETAS
	80 °C	PROBETAS	300,600,1000	TEMPERATURAS
No. probetas				
3	3	6	300,600,1000	27
3	3	6	300,600,1000	27
3	3	6	300,600,1000	27
				81

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 RESIDUO DE DEMOLICION

4.1.1. Descripción a escala macroscópica. El residuo de demolición corresponde a un conglomerado polimictico de color gris claro, con cantos (granos) que varían de tamaño arena muy gruesa a guijarro; son de forma subangular a angular.. Los cantos presentan diferentes ambientes de formación; sedimentario, ígneo y metamórfico.

Figura 7. Fotografía a escala macroscópica del residuo de concreto



4.1.2. Descripción de la sección delgada. La muestra se puede clasificar como un conglomerado con una matriz de material sericítico y calcáreo con abundantes fragmentos de cuarzo y de roca de los tres tipos. En su gran mayoría son metasedimentarios tipo metaconglomerado, chert, subarcosa, metaigneos como la granodiorita y metamórficos como un esquisto cuarzomícáceo y cuarcita. Se observa vidrio volcánico que se está alterando a arcilla.

Observaciones

Desde el punto de vista microscópico no se observa evidencia de una reacción álcali – sílice ya que presenta bordes definidos. Y además en ningún momento se observan minerales neoformados por reacciones entre el Na – K y los fragmentos de roca.

Hay muy pocos elementos alcalinos como el K, solamente los que están presentes en las micas.

Figura 8. Cuarzoarenita de grano arena muy fina hasta arena fina, con formas de los granos desde subangular hasta subredondeados. Composicionalmente consta de cuarzo (Qtz) monocristalino principalmente, se observan pellets de glauconita, óxidos de hierro (goetita). Como minerales accesorios se observa circón, turmalina (Tur) y minerales dúctiles como la moscovita a nivel trazas

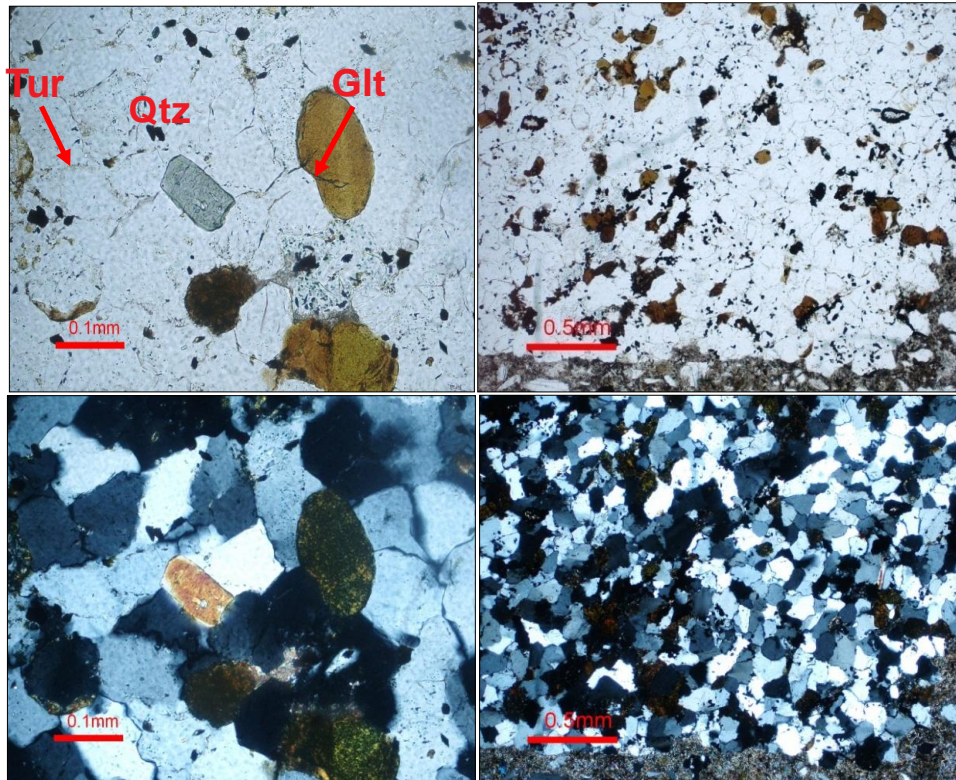


Figura 9. Lítico metasedimentario, compuesto principalmente por cuarzo y moscovita. El tamaño de los cuarzoes varía desde limo hasta arena muy fina; la moscovita está presente en forma a largada mostrando cierta orientación

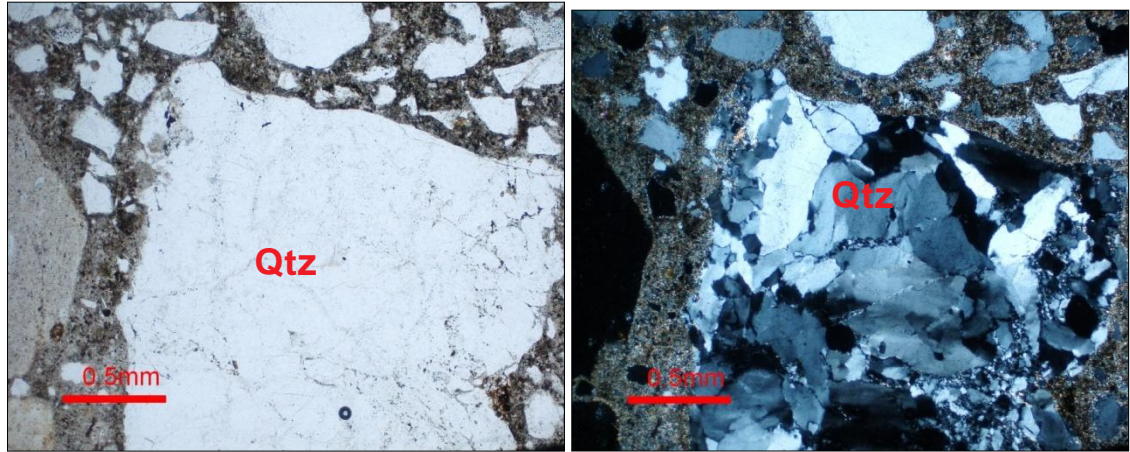


Figura 10. Cuarzoarenita de grano arena fina a arena gruesa, con formas subangulares a subredondeados pobremente seleccionados. Compuesta principalmente por cuarzoes de origen ígneo y metamórfico. En los intersticios se observa una matriz de minerales arcillosos indiferenciados acompañada de óxido de hierro (goetita).

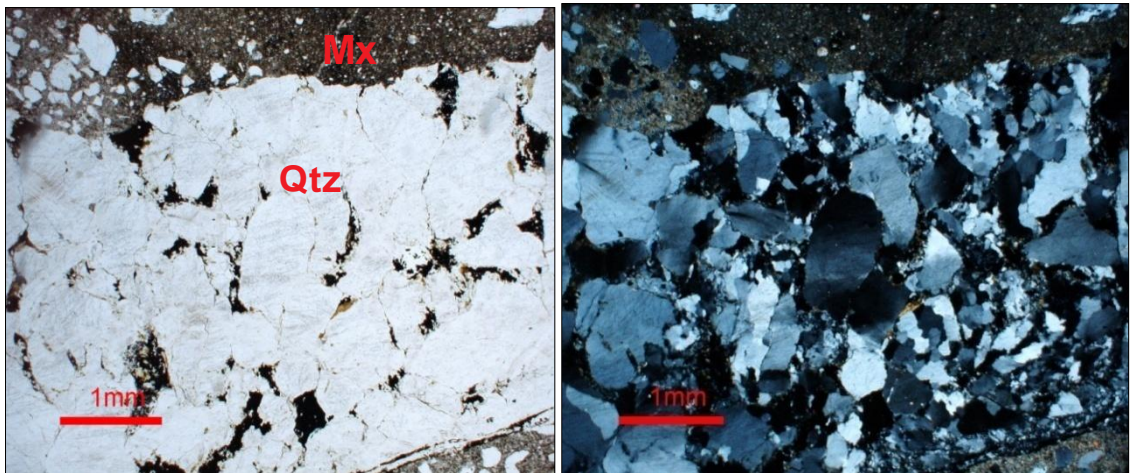


Figura 11. Cuarzoarenita de grano arena muy fina a limo con granos subredondeados, altamente cementada con sílice. Minerales accesorios como circón, turmalina

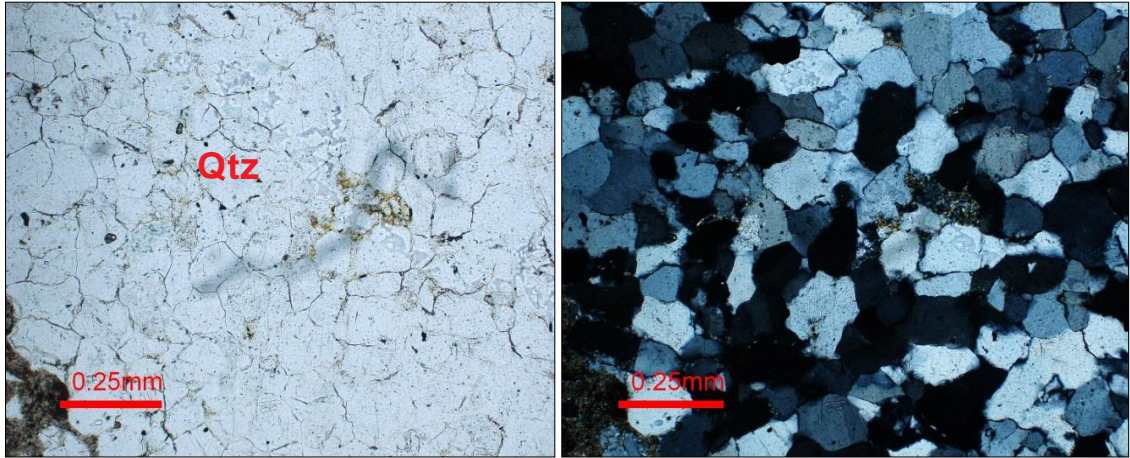


Figura 12. Cristal de plagioclasa altamente sericitizado, de forma subhedral, tamaño arena media.

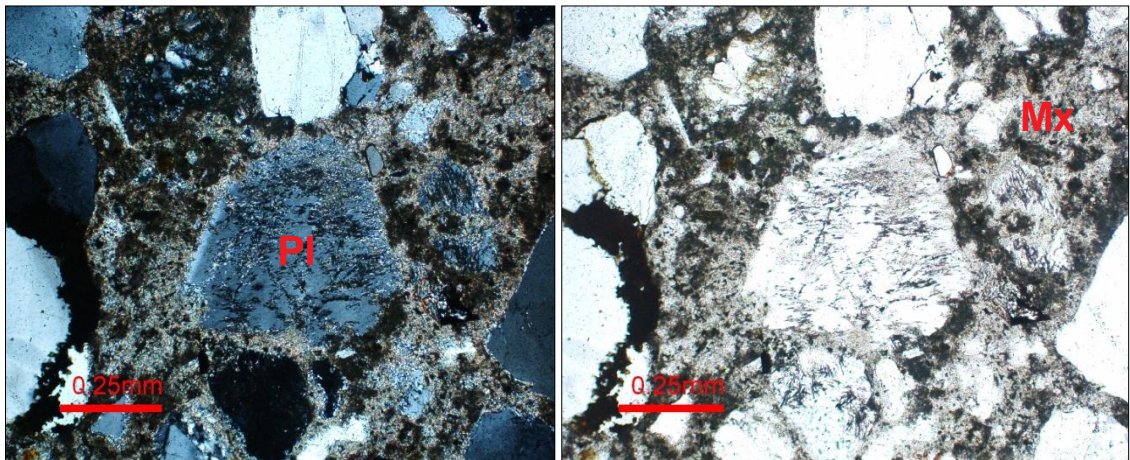


Figura 13. Lítico sedimentario compuesto principalmente por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa. Los cuarzos presentan tamaño arena muy fina hasta arena media de formas angulares a subredondeadas. Las plagioclasas se presentan en cristales bien definidos con sus típicas maclas, también se observan ductilizadas, localmente sericitizadas. El feldespato potásico se observa en forma de intercrecimiento con cristales de cuarzo formando así la textura mirmequítica y gráfica, las cuales indican que el origen de estos cuarzos es ígneo. Como minerales accesorios se observa biotita, clorita (producto de la alteración de la biotita).

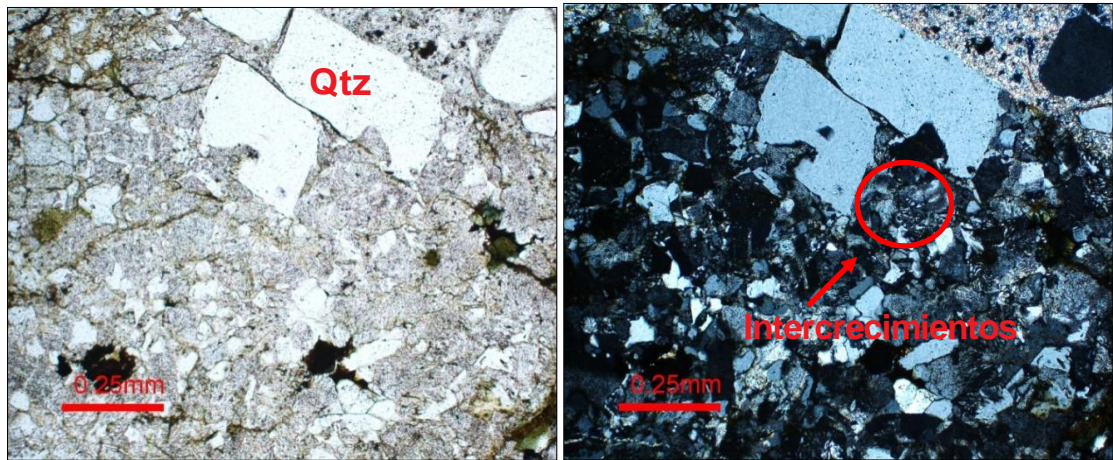


Figura 14. Cuarzo policristalino de origen metamórfico, posiblemente correspondiente a una cuarcita, los cristales de cuarzo son de forma subhedral, se observan levemente bandeados

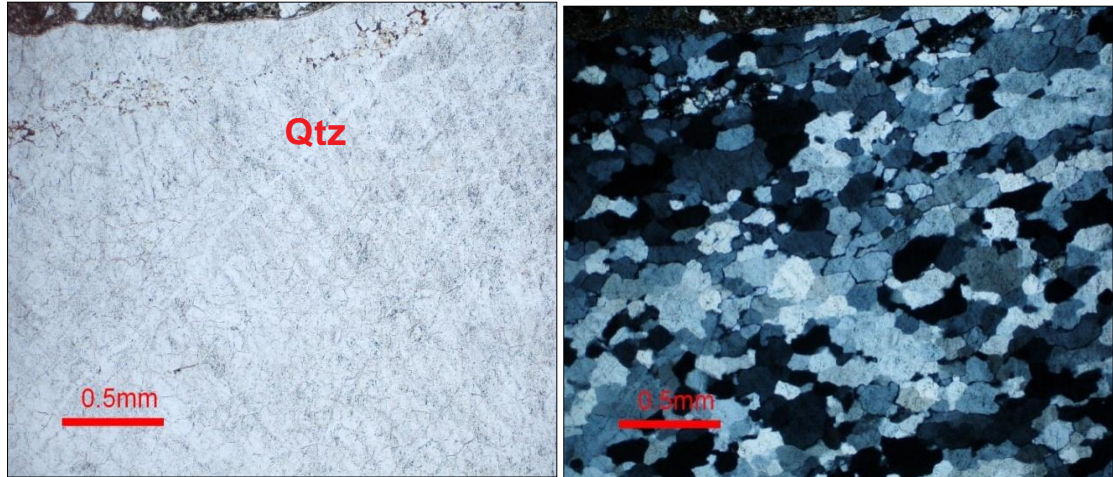


Figura 15. Cuarzoarenita de grano arena fina a arena gruesa, con formas subangulares a subredondeados pobremente seleccionados. Compuesta principalmente por cuarzos de origen ígneo y metamórfico. En los intersticios se observa una matriz de minerales arcillosos indiferenciados acompañada de óxido de hierro (goetita).

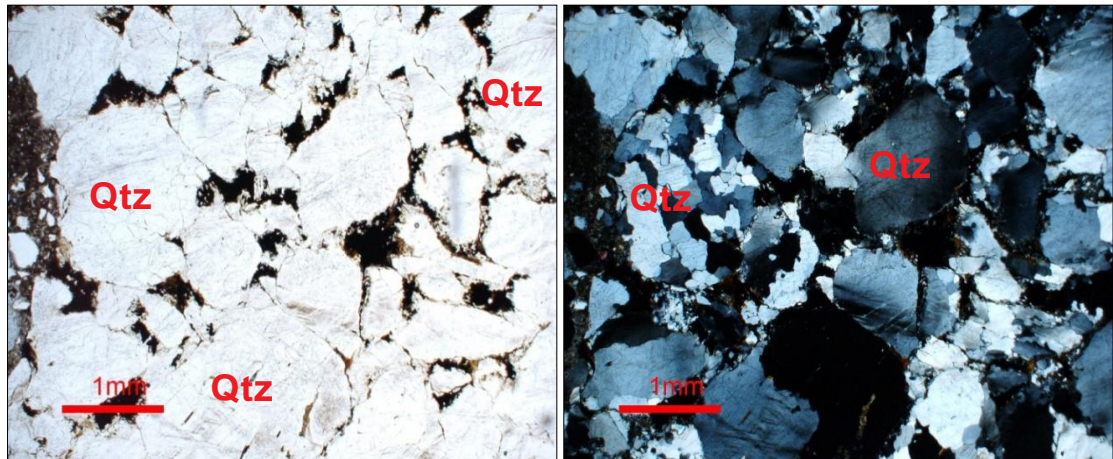


Figura 16. Cuarzo policristalino de origen metamórfico, de tamaño guija

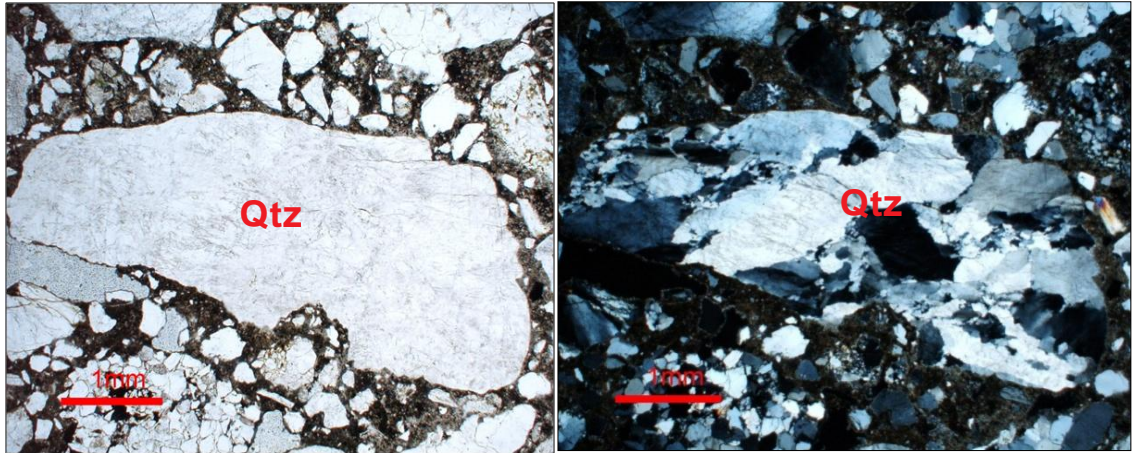


Figura 17. Mineral de moscovita que se observa ductilizada, tamaño arena media, con colores típicos de birrefringencia

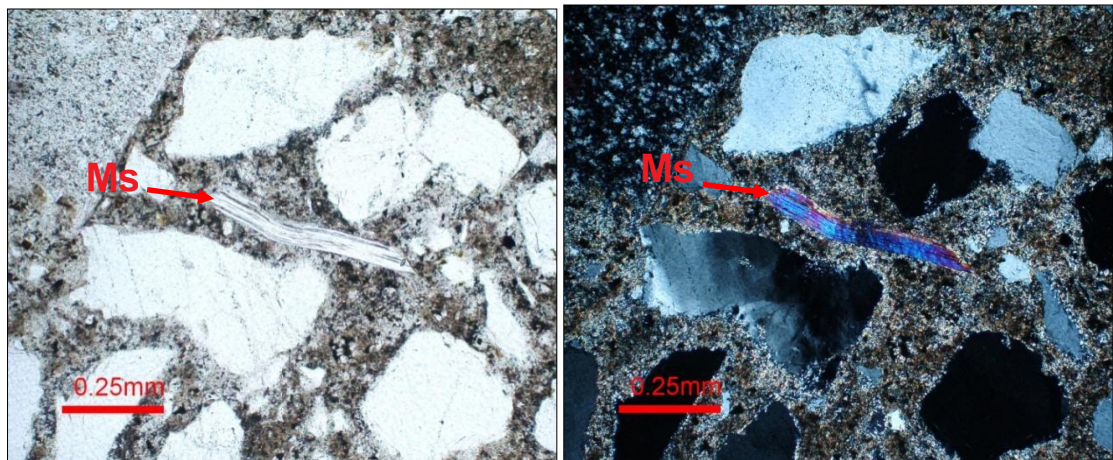


Figura 18. Cristal de plagioclasa altamente sericitizado, tamaño arena media con forma subhedral.

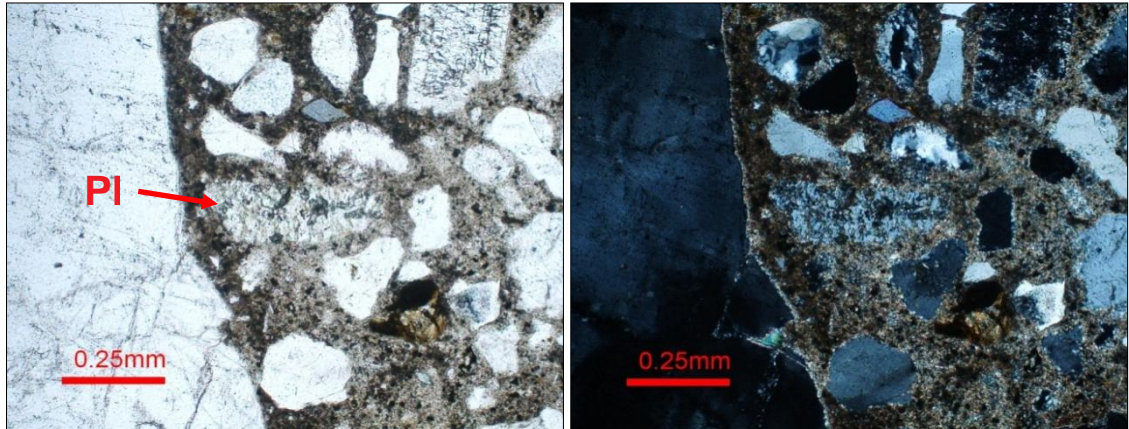


Figura 19. Lítico sedimentario tipo chert, de textura microcristalina con tamaño arena muy gruesa, forma subredondeada. Se observan radiolarios.

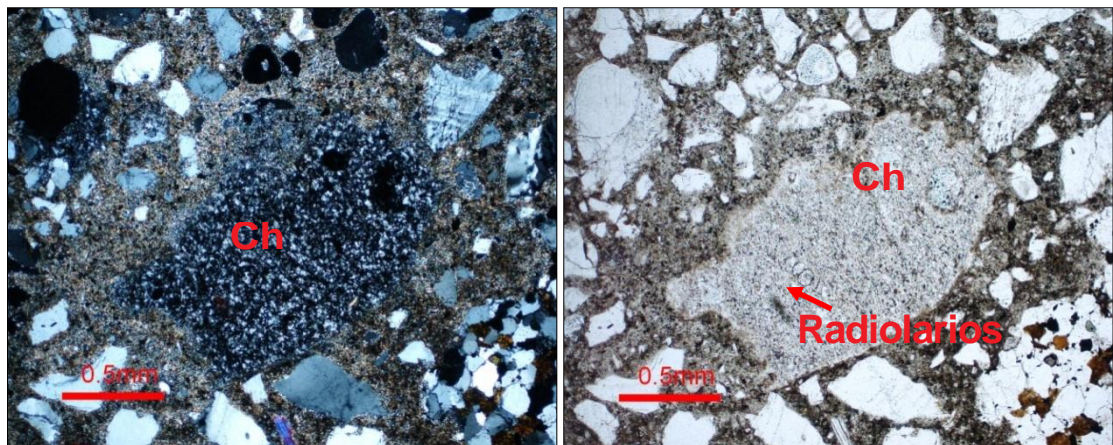


Figura 20. Minerales opacos, correspondientes a óxidos de hierro (Goetita).

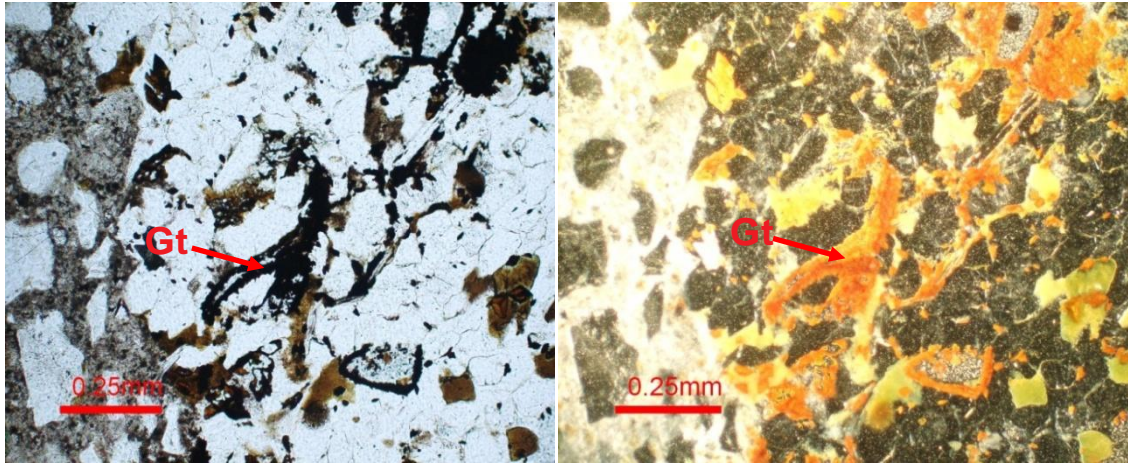
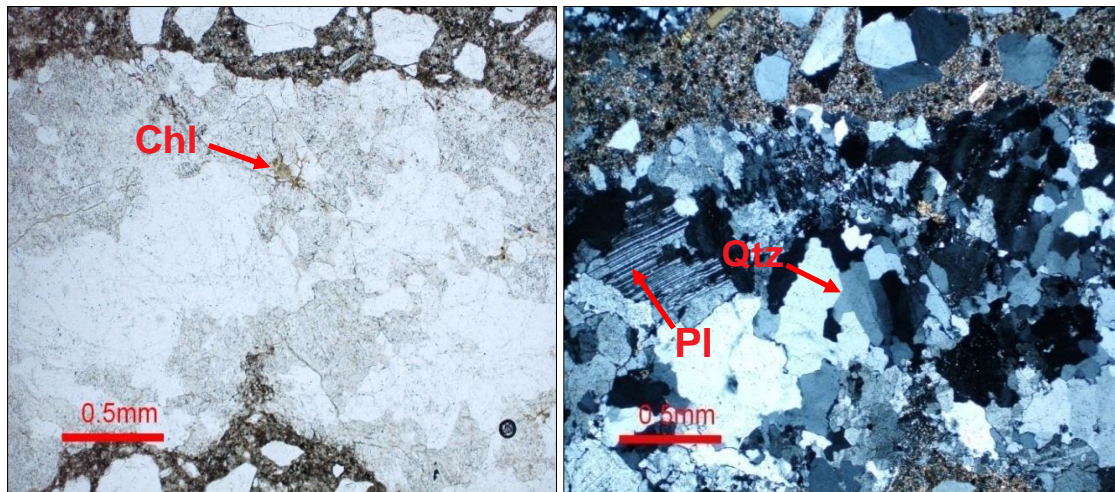
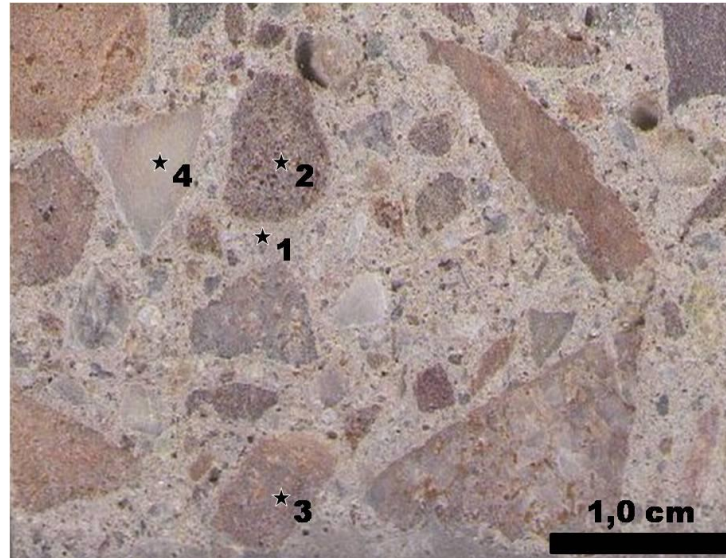


Figura 21. Lítico plutónico compuesto principalmente por cuarzo, plagioclasa. Como minerales accesorios presenta circón y clorita.



4.1.3 Análisis mineralógico por Fluorescencia de Rayos X (FRX) del RCD: En la Figura 22 se ilustra una fotografía a escala macroscópica del residuo de concreto utilizado en el presente estudio como material alternativo al cemento Portland tipo I, en la que los números y estrellas negras indican los puntos en donde se determinó la composición química por FRX.

Figura 22. Fotografía a escala macroscópica del residuo de concreto. Los números y estrellas negras indican los puntos en donde se determinó la composición química por FRX.



Los números 1, 2, 3, y 4 representan los puntos en los cuales se determinó la composición química por FRX tanto en la matriz como en los agregados que constituyen el residuo de concreto. Los resultados de FRX se describen a continuación. Del análisis elemental por FRX se puede observar que la gran cantidad determinada de Silicio (Si) y Aluminio (Al) en el residuo de concreto se encuentra en parte presente en las fases cristalinas: cuarzo y plagioclasa, principalmente. La naturaleza silicatada del residuo de concreto es justificada en la absoluta predominancia del compuesto SiO_2 (78,5% en la matriz y 91,5-97,8% en los agregados). El contenido de Al_2O_3 varía de 12,5% en la matriz a 1,9-4,1% en los agregados. Si bien es cierto que los procesos de geopolimerización se dan con éxito en la gran mayoría de los materiales alumino-silicatados (Davidovits, 1993), la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ es un condicionante de típico geoquímico que debe ser tenido en cuenta a la hora de medir el desempeño y durabilidad de cementos inorgánicos alternativos al cemento convencional portland (Duxson et al., 2007). El contenido de CaO está en el rango de 12,5% en la matriz y 0,03-0,61% en los

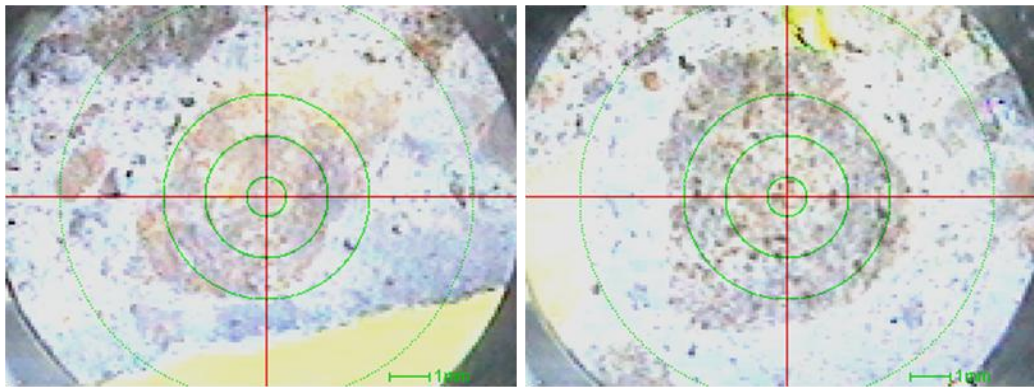
agregados. Otros componentes presentes en pequeñas cantidades son: que SO_3 (1,31% en la matriz) Fe_2O_3 (0,03-2,34% en los agregados).

4.1.4. Análisis mineralógico (FRX)

Figura 23. Sección delgada del concreto.



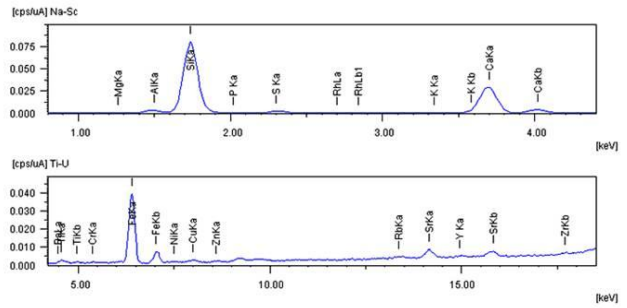
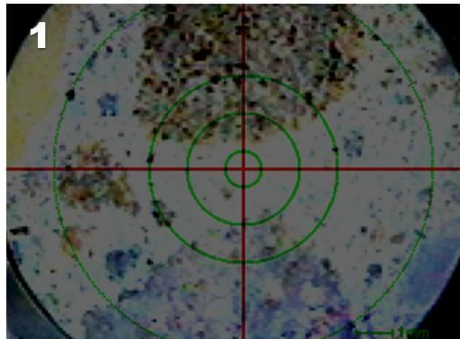
Figura 24. Sección a 1mm y 3 mm de distancia de la fuente de energía.



Las fases mineralógicas estudiadas en la sección delgada de la muestra de concretos (Figura 25), a diferentes diámetros de irradiación están registradas en la tabla 12; estos datos están dados en porcentaje en peso.

Figura 25. Datos del análisis por FRX de la matriz del residuo de concreto.

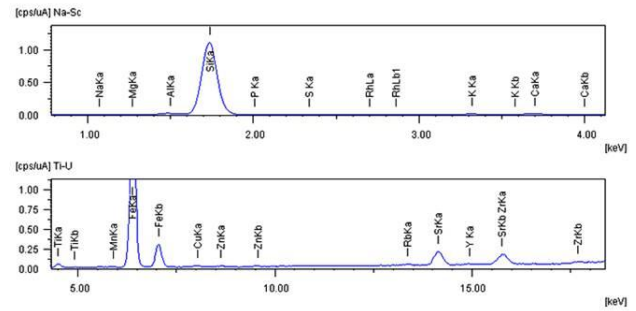
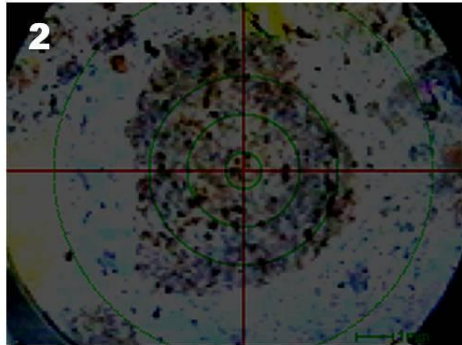
Punto 1: (1 mm)



SiO2	78.536	⊘	(0.264)
CaO	12.470	⊘	(0.064)
Al2O3	6.210	⊘	(0.112)
SO3	1.308	⊘	(0.028)
Fe2O3	0.728	⊘	(0.005)
K2O	0.268	⊘	(0.015)
TiO2	0.163	⊘	(0.007)
MgO	0.162	⊘	(0.103)
P2O5	0.084	⊘	(0.051)
BaO	0.024	⊘	(0.009)
Cr2O3	0.014	⊘	(0.003)
SrO	0.013	⊘	(0.000)
CuO	0.011	⊘	(0.001)
NiO	0.004	⊘	(0.001)
Rb2O	0.002	⊘	(0.000)
ZnO	0.002	⊘	(0.001)
Y2O3	0.001	⊘	(0.000)

Figura 26. Datos del análisis por FRX del punto 1 de la figura 23 de un agregado del residuo de concreto.

Punto 2: (3 mm)



SiO2	91.488	⊘	(0.124)
Al2O3	4.054	⊘	(0.047)
Fe2O3	2.336	⊘	(0.008)
CaO	0.627	⊘	(0.007)
K2O	0.604	⊘	(0.008)
TiO2	0.225	⊘	(0.006)
MgO	0.186	⊘	(0.047)
SO3	0.185	⊘	(0.006)
Na2O	0.169	⊘	(0.082)
P2O5	0.041	⊘	(0.023)
SrO	0.035	⊘	(0.000)
ZrO2	0.022	⊘	(0.000)
MnO	0.012	⊘	(0.002)
CuO	0.008	⊘	(0.001)
ZnO	0.006	⊘	(0.001)
Rb2O	0.002	⊘	(0.000)
Y2O3	0.002	⊘	(0.000)

Figura 27. Datos del análisis por FRX del punto 1 de la figura 22 de un agregado del residuo de concreto.

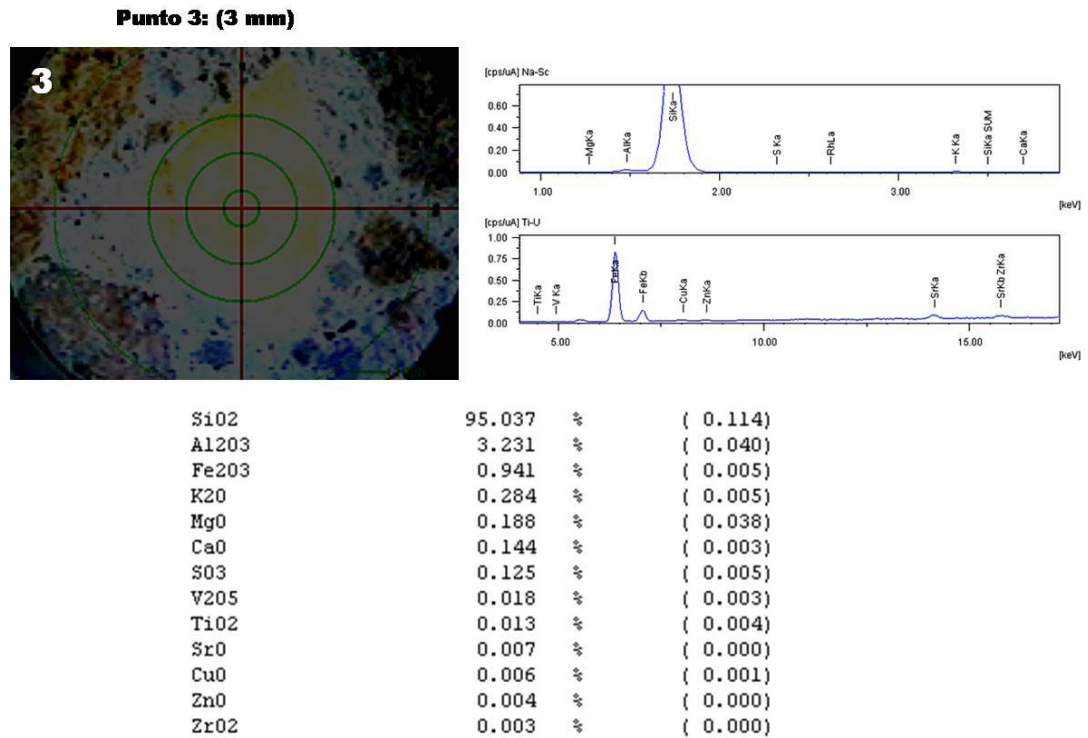
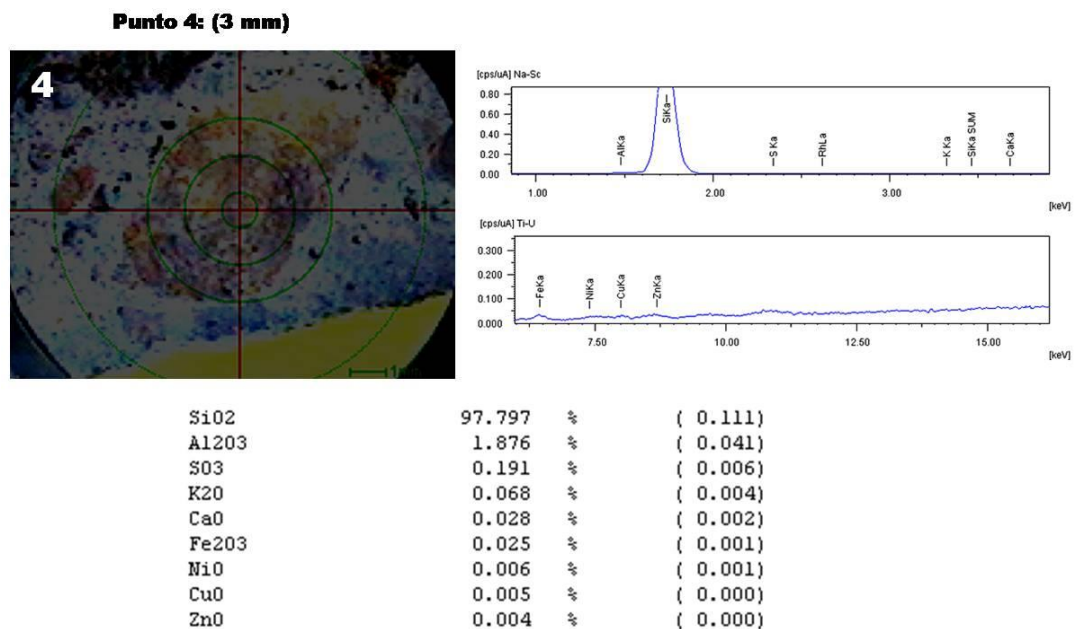


Figura 28. Datos del análisis por FRX del punto 1 de la figura 22 de un agregado del residuo de concreto.

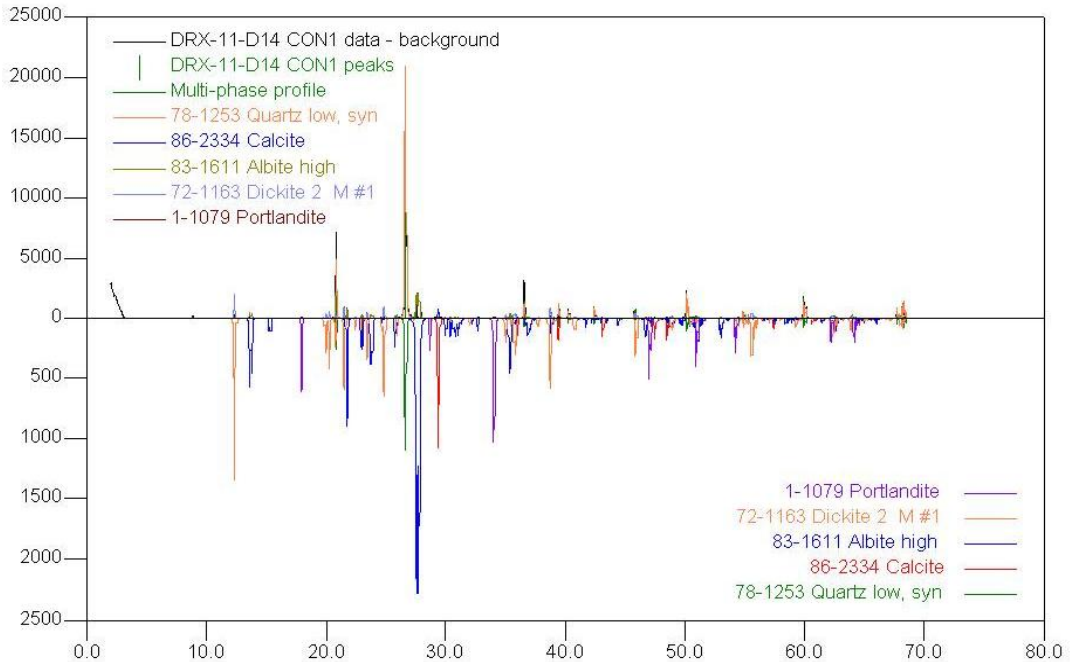


4.1.5 Análisis de difracción de rayos X del RDC. El análisis de DRX permitió determinar las fases minerales cristalinas y amorfas de los materiales. La caracterización mineralógica por DRX del residuo de demolición revela que este material está compuesto principalmente por las fases cristalinas cuarzo bajo (SiO_2), calcita (CaCO_3), albita alta ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), dickita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) y portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que de acuerdo a (Guirado y Servando, 2000) la portlandita es una fase mineral que se forma en la hidratación de los silicatos cálcicos tal como se ilustra en la Figura 30.

PROCEDIMIENTO

Este método se basa en la interacción entre los rayos X y la materia cristalina que produce la difracción. Así pues, cuando la radiación incide sobre una estructura cristalina se produce la difracción del haz cuando se cumple ($n \lambda = 2d \sin \theta$), y manteniendo la 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 toman del material proveniente preparado y se colocan en el portamuestras. La muestra es irradiada con rayos X de una determinada longitud de onda y la muestra y detector giraran simultáneamente cambiando el ángulo, así, a medida que los diferentes planos se ajustan a la ley de Bragg se produce la difracción. Los análisis fueron realizados en un equipo marca *RIGAKU* modelo *D/MAX III B* ubicado en el Laboratorio de rayos-X de la Unidad de Caracterización y Estructura de Materiales del Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas de Maracaibo (Venezuela).

Figura 29. Perfil de DRX del residuo de concreto.



4.1.6. Peso específico del RDC. La principal utilidad que tiene el peso específico del residuo está relacionada con el diseño y control de mezclas de concreto, con el fin de estudiar a fondo las propiedades de la pasta de cemento, es de suma importancia indagar y evaluar acerca de los rangos o posibles variaciones que puedan tener estas para que se encuentre en situaciones óptimas, teniendo como fin último su mejor rendimiento y utilización. En esta ocasión, se analizará el peso específico de una muestra de cemento portland tipo I, con la ayuda de la NORMA ICONTEC 221 Método de ensayo para determinar el Peso Específico del Cemento Hidráulico.

Resultados

La cantidad utilizada de residuo fue de 64gr. La temperatura a la cual se realizó el ensayo fue de 21°C.

La diferencia entre las lecturas final e inicial representará el volumen de líquido desplazado por la masa del material de tal manera que la densidad o peso específico será:

Peso Específico= Peso del residuo de demolición (gr) / Volumen desplazado

Peso Específico= (64 GRS.)/(Lf - L0)

(Lf - L0) = volumen desplazado

Lectura Inicial: 0.7 Cm³

Lectura Final: 22 Cm³

Volumen Desplazado: 21.7 cm³

Peso Específico (gr/cm³): 3.005 gr/cm³

4.1.7. Módulo de finura. El módulo de finura es un parámetro que se obtiene de la suma de los porcentajes retenidos acumulados de la serie de tamices especificados que cumplan con la relación 1:2 desde el tamiz # 100 en adelante hasta el tamaño máximo presente y dividido en 100 , para este cálculo no se incluyen los tamices de 1" y ½".

Cálculos:

F = Finura del residuo de demolición que pasa el tamiz 200

Rc = Residuo corregido

Rs = Residuo retenido en el tamiz 200

C = Factor de corrección del tamiz (0)

Rc = Rs (100+C)

Rc = 6,58gr

F = 100-Rc

F = 93.42 %

4.2. ARENA

4.2.1. Descripción mineralógica y textural

DESCRIPCIÓN TEXTURAL

Tamaño de grano:

El tamaño de grano de las partículas esta entre el rango de 1.19mm (Malla 16) y 0.074 mm(Malla 200)

Tabla 14. Escala de tamaño de grano de Udden-Wentworth

No de malla para tamiz U.S. estandar	Milímetros (mm)	Micrones (µ)	Phi (Φ)	Clase de tamaño Wentworth	Clase Mayor	Una vez Litificado el sedimento
			-20			
	4096		-12	Cantos	GRAVA	LOMERADO
	1024		-10			
	256		-8	Gujarros		
	64		-6			
	16		-4	Guijas		
			-2			
			-1			
			-0.75			
			-0.5			
			-0.25			
			0.0			
			0.25			
			0.5			
			0.75			
	1/2	500	1			
			1.25			
			1.5			
			1.75			
			2.0			
			2.25			
			2.5			
			2.75			
			3.0			
			3.25			
			3.5			
			3.75			
			4.0			
			4.25			
			4.5			
			4.75			
			5.0			
			5.25			
			5.5			
			5.75			
			6.0			
			6.25			
			6.5			
			6.75			
			7.0			
			7.25			
			7.5			
			7.75			
			8.0			
			8.25			
			8.5			
			8.75			
			9.0			
			9.25			
			9.5			
			9.75			
			10.0			
			10.25			
			10.5			
			10.75			
			11.0			
			11.25			
			11.5			
			11.75			
			12.0			
			12.25			
			12.5			
			12.75			
			13.0			
			13.25			
			13.5			
			13.75			
			14.0			
			14.25			
			14.5			
			14.75			
			15.0			
			15.25			
			15.5			
			15.75			
			16.0			
			16.25			
			16.5			
			16.75			
			17.0			
			17.25			
			17.5			
			17.75			
			18.0			
			18.25			
			18.5			
			18.75			
			19.0			
			19.25			
			19.5			
			19.75			
			20.0			
			20.25			
			20.5			
			20.75			
			21.0			
			21.25			
			21.5			
			21.75			
			22.0			
			22.25			
			22.5			
			22.75			
			23.0			
			23.25			
			23.5			
			23.75			
			24.0			
			24.25			
			24.5			
			24.75			
			25.0			
			25.25			
			25.5			
			25.75			
			26.0			
			26.25			
			26.5			
			26.75			
			27.0			
			27.25			
			27.5			
			27.75			
			28.0			
			28.25			
			28.5			
			28.75			
			29.0			
			29.25			
			29.5			
			29.75			
			30.0			
			30.25			
			30.5			
			30.75			
			31.0			
			31.25			
			31.5			
			31.75			
			32.0			
			32.25			
			32.5			
			32.75			
			33.0			
			33.25			
			33.5			
			33.75			
			34.0			
			34.25			
			34.5			
			34.75			
			35.0			
			35.25			
			35.5			
			35.75			
			36.0			
			36.25			
			36.5			
			36.75			
			37.0			
			37.25			
			37.5			
			37.75			
			38.0			
			38.25			
			38.5			
			38.75			
			39.0			
			39.25			
			39.5			
			39.75			
			40.0			
			40.25			
			40.5			
			40.75			
			41.0			
			41.25			
			41.5			
			41.75			
			42.0			
			42.25			
			42.5			
			42.75			
			43.0			
			43.25			
			43.5			
			43.75			
			44.0			
			44.25			
			44.5			
			44.75			
			45.0			
			45.25			
			45.5			
			45.75			
			46.0			
			46.25			
			46.5			
			46.75			
			47.0			
			47.25			
			47.5			
			47.75			
			48.0			
			48.25			
			48.5			
			48.75			
			49.0			
			49.25			
			49.5			
			49.75			
			50.0			
			50.25			
			50.5			
			50.75			
			51.0			
			51.25			
			51.5			
			51.75			
			52.0			
			52.25			
			52.5			
			52.75			
			53.0			
			53.25			
			53.5			
			53.75			
			54.0			
			54.25			
			54.5			
			54.75			
			55.0			
			55.25			
			55.5			
			55.75			
			56.0			
			56.25			
			56.5			
			56.75			
			57.0			
			57.25			
			57.5			
			57.75			
			58.0			
			58.25			
			58.5			
			58.75			
			59.0			
			59.25			
			59.5			
			59.75			
			60.0			
			60.25			
			60.5			
			60.75			
			61.0			
			61.25			
			61.5			
			61.75			
			62.0			
			62.25			
			62.5			
			62.75			
			63.0			
			63.25			
			63.5			
			63.75			
			64.0			
			64.25			
			64.5			
			64.75			
			65.0			
			65.25			
			65.5			
			65.75			
			66.0			
			66.25			
			66.5			
			66.75			
			67.0			
			67.25			
			67.5			
			67.75			
			68.0			
			68.25			
			68.5			
			68.75			
			69.0			
			69.25			
			69.5			
			69.75			
			70.0			
			70.25			
			70.5			
			70.75			
			71.0			
			71.25			
			71.5			
			71.75			
			72.0			
			72.25			
			72.5			
			72.75			
			73.0			
			73.25			
			73.5			
			73.75			
			74.0			
			74.25			
			74.5			
			74.75			

Forma de las partículas: Predominaron las formas no esféricas sub-angulares a angulares.

Empaquetamiento: No se pudo abarcar este aspecto textural por tratarse de un material no consolidado.

Fábrica (armazón, matriz, cemento, poros): No se pudo abarcar cada uno de estos aspectos texturales por tratarse de un material no consolidado.

Contacto entre las partículas: No se pudo abarcar este aspecto textural por tratarse de un material no consolidado.

Resumen de la muestra: Arena de fina a media, constituida principalmente por partículas no esféricas sub-angulares a angulares.

Cualquiera sea el tipo de material utilizado, sus partículas deben ser duras y resistentes, ya que el concreto, como cualquier otro material se romperá por su elemento más débil. Si el agregado es de mala calidad sus partículas se romperán antes que la pasta cementicia, o el mortero. (Guirado y Servando, 2000)

4.2.2. Análisis granulométrico de la arena. La granulometría de la arena utilizada en la preparación de las probetas fue realizada de acuerdo a la norma ICONTEC 77, para el tamizado de materiales granulados (agregados o áridos con el fin determinar su composición granulométrica).

Este ensayo fue realizado en el laboratorio de caracterización de materiales del edificio Álvaro Beltrán Pinzón de la Escuela de Ingeniería Civil de la UIS.

PROCEDIMIENTO

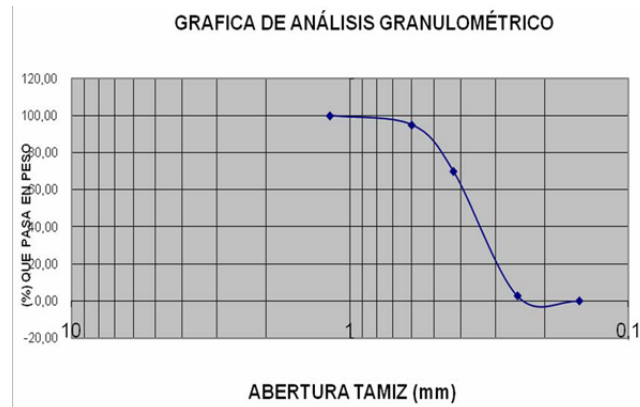
La operación de tamizado debe realizarse de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana # 77 sobre una cantidad de material seco. El manejo de los tamices se puede llevar a cabo a mano o mediante el empleo de la máquina adecuada. El tamizado a mano se hace de tal manera que el material se mantenga en movimiento circular con una mano mientras se golpea con la otra, pero en ningún caso se debe inducir con la mano el paso de una partícula a través del tamiz; Recomendando, que los resultados del análisis en tamiz se coloquen en forma tabular. Siguiendo la respectiva recomendación, en la columna 1 se indica la serie de tamices utilizada en orden descendente. Después de tamizar la muestra como lo estipula la Norma Técnica Colombiana # 77 se toma el material retenido en cada tamiz, se pesa, y cada valor se coloca en la columna 2. Cada uno de estos pesos retenidos se expresa como porcentaje (retenido) del peso total de la muestra.

Fórmula. % Retenido = $\frac{\text{Peso de material retenido en tamiz}}{\text{Peso total}} * 100$

Tabla 15. Análisis granulométrico por tamizado de la arena

TAMIZ Nº	ABERTURA TAMIZ	PESO RETENIDO (Grs)	(%) RETENIDO	(%) RETENIDO ACUMULADO
4	4.75	0	0	0
8	2.36	10	1,00	1,00
16	1.18	3,5	0,35	1,35
30	0.6	183,5	18,35	20,65
50	0.25	737,5	73,75	94,4
100	0.15	65,5	6,55	100
FONDO		0		
TOTAL		1000		

Figura 30. Análisis granulométrico de la arena.

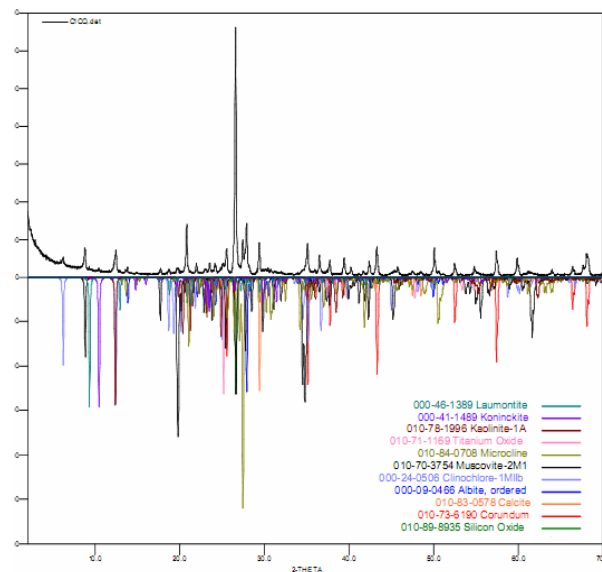


RESULTADOS

Al realizar los cálculos esto nos indica que contamos con una arena que se encuentra entre los intervalos especificados que son 2,3 y 3,1; concluyendo de esta manera que es una arena adecuada para diseñar una buena mezcla para concreto.

4.2.3. Análisis mineralógico (DRX)

Figura 31. Perfil de DRX de la arena



4.2.4. Peso específico y absorción de agregados finos. El peso específico del cemento es un factor de cierta relevancia en el estudio de las propiedades del mismo, aunque cabe destacar que no es un índice de su calidad, sino por el contrario es usado para el cálculo de peso y volúmenes en una mezcla de concreto y para deducir otras características del cemento, principalmente

Cálculos:

Tabla 16. Cálculos para determinar el peso específico y la absorción de agregados finos.

	PESOS	Datos tomados	Cálculos (gr / ml)
A	Peso al aire de la muestra secada en elhorno, (gr).	493	
B	Peso del picnómetro aforado lleno de agua(gr).	640	
C	Peso total del picnómetro aforado con lamuestra y lleno de agua (gr).	937	
S	Peso al aire de la muestra saturada consuperficie seca, (gr).	500	
Pa	Peso específico aparente = $A/(B+S-C)$		2,43
Pass	Peso específico aparente saturada y superficialmente seca = $S/(B+S-C)$		2,46
Pn	Peso específico nominal = $A/(B+A-C)$		2,52
Am	Absorción máxima de agua (%) = $((SA)/A)*100$		1,42

4.2.5. Cantidad de materia orgánica

Cálculos:

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

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

W, Material seco utilizado en la prueba g = 10

$$VA = (C \times V) / W$$

$$VA = (5 \times 14) / 10 = 7$$

Tabla 16. Valor de azul de metileno y el comportamiento esperado de la arena.

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

4.3. CEMENTO

4.3.1. Peso específico

Cálculos:

PESO ESPECIFICO = Peso del cemento (gr) / Volumen desplazado (ml)

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

4.3.2. Módulo de finura

Cálculos:

F = Finura del cemento pasa el tamiz 200

Rc = Residuo corregido

R_s = Residuo retenido en el tamiz 200

C = Factor de corrección del tamiz (0)

$R_c = R_s (100+C)$

$R_c = 0.89\text{gr}$

$F = 100-R_c$

$F = 99.11 \%$

4.4. DISCUSION DE RESULTADOS

4.4.1. Resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión se determinó a edades de curado de 7,14, 28 y 56 días a cada una de las probetas preparadas. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 17. En la figura 32 se muestra el comportamiento mecánico de los morteros activados alcalinamente frente a los morteros de CPTA y CPT80 de referencia.

NOMENCLATURA UTILIZADA EN LA TABLA

CPTA = Cemento Portland a temperatura ambiente

CPT80 = Cemento Portland a 80 °

RDD25T80 = Mortero sustituido al 25% de residuo de demolición a una temperatura de 80°

RDD25TA = Mortero sustituido al 25% de residuo de demolición a temperatura ambiente

RDD50T80 = Mortero sustituido al 50% de residuo de demolición a temperatura de 80°

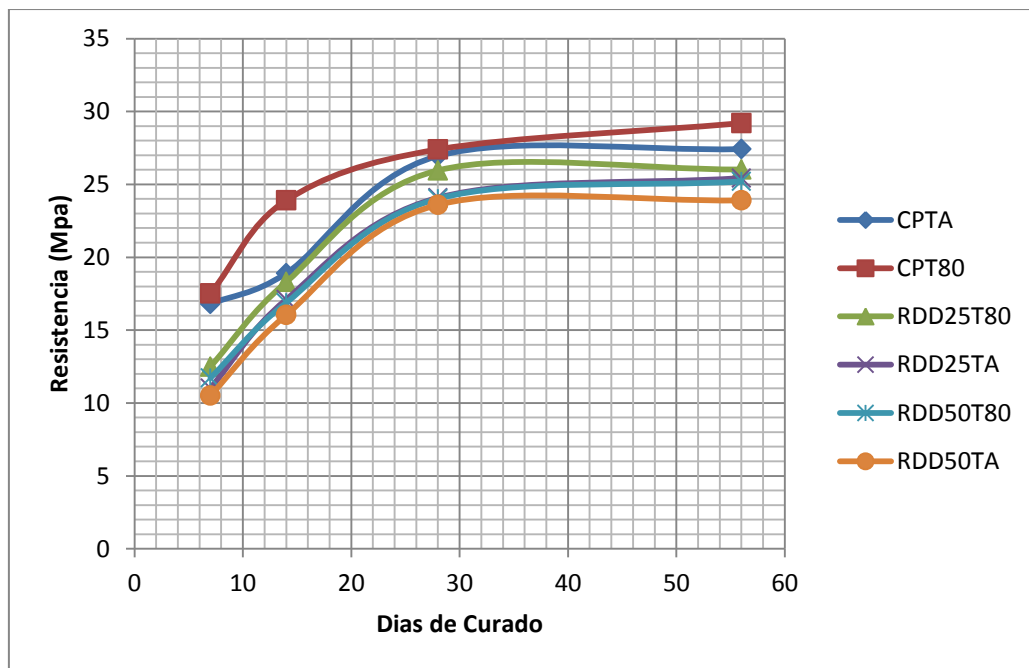
RDD50TA = Mortero sustituido al 50% de residuo de demolición a temperatura ambiente

Tabla 17 Promedio aritmético de la resistencia a la compresión (MPa) de las diferentes mezclas

DIAS DE CURADO	CPTA	CPT80	RDD25T80	RDD25TA	RDD50T80	RDD50TA
7	16,8	17,51	12,5	11,02	11,72	10,52
14	18,9	23,9	18,3	17,1	16,88	16,04
28	26,95	27,4	25,96	24,08	24,02	23,6
56	27,42	29,2	26,02	25,43	25,2	23,9

Fuente: Autores del Proyecto

Figura 32. Resistencia a la compresión de los morteros



Fuente: Autores del Proyecto

Como se puede apreciar en la figura 32 los morteros elaborados CPTA y CPT80 presentaron resultados superiores a los elaborados con residuo de demolición y construcción. Con base en los resultados de resistencia a la compresión obtenidos, las probetas que presentaron el mejor desempeño mecánico corresponden a las mezclas de CPTA con un valor de 27.42 MPa y CPT80 con valor de 29. MPa, respectivamente a los 56 días de curado; las probetas geopoliméricas RDD25TA

alcanzaron entre 66 y 93%, las probetas RDD25T80 alcanzaron de 71% a 95%, las probetas RDD50TA alcanzaron entre 63% y 88%, las probetas RDD50T80 alcanzaron entre 67% a 88% de la resistencia adquirida por las probetas de CPO como se observa en la tabla 18. Las probetas curadas a 80°C durante 24 horas presentan una resistencia a la compresión un poco mayor que la de las probetas geopoliméricas curadas a temperatura ambiente, debido a la aceleración que causa en la reacción de geopolimerización. (Bakharev, 2005; Palomo et al., 1999). Observando el comportamiento de las probetas geopoliméricas se puede deducir que su cementación es muy similar a las probetas hechas con CP, dando así resultados aceptables.

Tabla 18. Comparación de resistencias a compresión expresada en (%)

DIAS DE CURADO	CPTA	CPT80	RDD25T80	RDD25TA	RDD50T80	RDD50TA
7	100	100	71,39	65,6	66,93	62,62
14	100	100	76,6	90,47	70,62	84,87
28	100	100	94,75	89,35	87,66	87,6
56	100	100	89,11	92,47	86,3	87,2

Fuente: Autores del Proyecto

Comparando estos resultados con las tesis de Hernando Álvarez (puzolana) Tabla 19, Paola Flórez y Fabiola Coronado (Granito y ladrillo) Tabla 20, se observa que en cuanto a la puzolana y al residuo de demolición, factores como, mayor tiempo de curado y someter las probetas a ciertas temperaturas son determinantes para mejorar la resistencia de estas. En el caso del granito y el ladrillo su mayor rendimiento se presenta a los 14 días de curado. No fue posible comparar el factor de temperatura ya que las probetas fueron sometidas exclusivamente a temperatura ambiente.

Ninguno de estos materiales (puzolana, residuo de demolición, granito y ladrillo) logro superar la resistencia a la compresión de un mortero hecho con cemento portland, estos superan en un promedio de 20 a 30% a los morteros que contienen los materiales nombrados anteriormente.

Tabla 20 .Resistencia a la compresión para probetas con Puzolana

Días de curado	CPOANL MPa	CPOAL MPa	GANL MPa	GAL MPa	GANL65 MPa	GAL65 MPa
7	17,55	19,34	13,31	14,26	13,00	14,44
14	23,35	25,42	16,63	18,25	16,93	18,48
28	27,40	28,88	18,26	19,73	18,58	20,10
80	27,92	29,00	19,40	19,96	19,16	19,52

Fuente: Tomado de tesis Hernando Álvarez

Nomenclatura CPO = Cemento Portland

ANL = Arena no lavada

AL= Arena lavada

G= Mortero elaborados con geopolimeros (Puzolana)

GANL65 = Mortero elaborados con geopolimeros con arena no lavada y sustitución del 65% con puzolana.

Tabla 19. Resistencia a la compresión para probetas con granito y ladrillo

Días de curado	CGALT A MPa	CGANLT A MPa	CLALT A MPa	CLANLT A MPa	GALT A MPa	GANLT A MPa	LALT A MPa	LANLT A MPa
7	24,7	22,7	16,7	12,2	3,8	3,1	9,2	5,9
14	27,6	26,7	18,7	19,0	8,1	6,7	16,2	7,9
28	22,9	22,7	18,8	17,3	23,3	25,9	26,8	29,5

Fuente: Tomado de la tesis de Fabiola Coronado y Paola Flórez

4.4.2. Ataque de sulfatos. Las probetas fueron sometidas a inmersión después de 28 días de curado en una solución de $MgSO_4$ a una concentración de 50g/L y un pH controlado. Para este caso se evaluó la resistencia mecánica de las probetas y la pérdida de masa de cada una de estas generadas por el ataque con sulfatos. Cada 7 días durante 4 semanas se ensayaron 3 probetas para la prueba

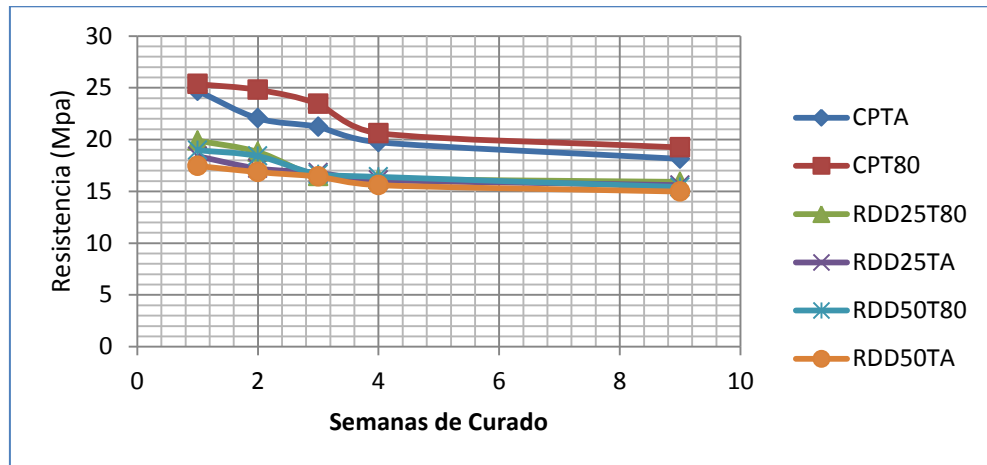
de resistencia a la compresión, observándose que en cada una de estas disminuyo notablemente su resistencia debido a la interacción fisicoquímica en la cual se ven involucrados los minerales que hacen parte de la pasta de cemento y los iones de sulfato presentes en la solución en la cual fueron sumergidas las probetas, adicionalmente se generaron grietas, pérdida de masa y desintegración de los morteros generalmente en los bordes. En la figura 33 se observa que las probetas elaboradas con CP son menos vulnerables al ataque con sulfatos de magnesio que las probetas geopoliméricas, si se compara con la resistencia inicial las probetas de CP pierden hasta el 27% de la resistencia a la compresión estimada a los 28 días de curado luego de estar sumergidas 9 semanas, en cuanto a las probetas geopoliméricas el porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión es hasta del 34% sometidas a iguales condiciones y a idéntico tiempo.

Tabla 20. Promedio aritmético de la resistencia a la compresión por ataques con sulfatos de magnesio de las diferentes mezclas

SEMANAS	CPTA	CPT80	RDD25T80	RDD25TA	RDD50T80	RDD50TA
1	24,7	25,35	19,9	18,39	18,97	17,46
2	22,05	24,8	18,8	17,21	18,4	16,86
3	21,23	23,45	16,45	16,8	16,65	16,42
4	19,74	20,62	16,2	16,1	16,4	15,6
9	18,14	19,24	15,92	15,6	15,42	14,98

Fuente: Autor del Proyecto

Figura 33. Resistencia a la compresión por ataques con sulfatos de magnesio (MgSO₄)



Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 21. Valores de resistencia a la compresión por ataque con sulfatos de magnesio a los 28 días.

DIAS	CPTA	CPT80	RDD25TA	RDD25T80	RDD50TA	RDD50T80
28	19,74	20,62	16,1	16,2	15,6	16,4

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 22. Valores de resistencia a la compresión a los 28 días.

DIAS	CPTA	CPT80	RDD25TA	RDD25T80	RDD50TA	RDD50T80
28	26,95	27,4	24,08	25,96	23,6	24,02

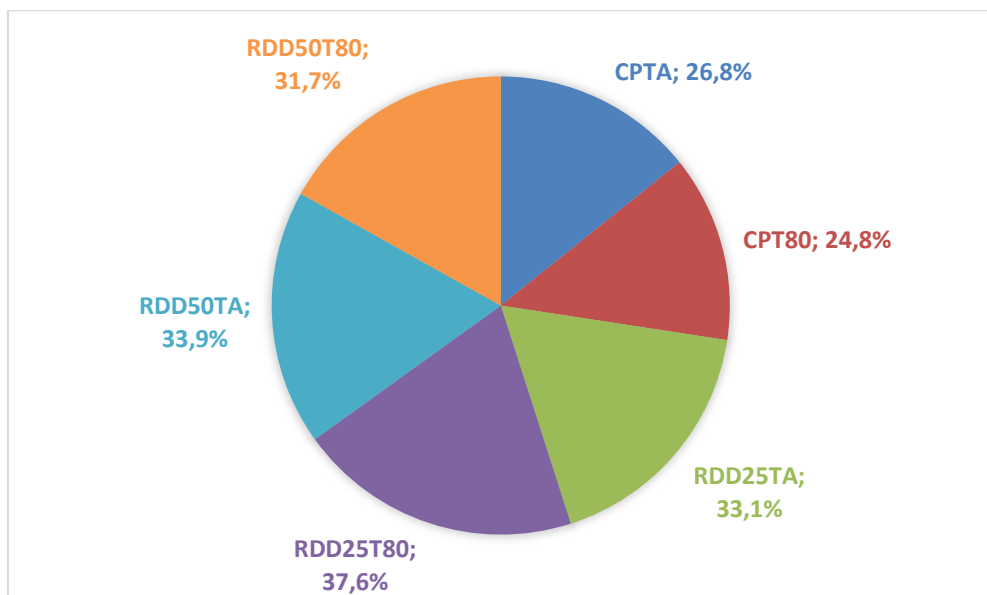
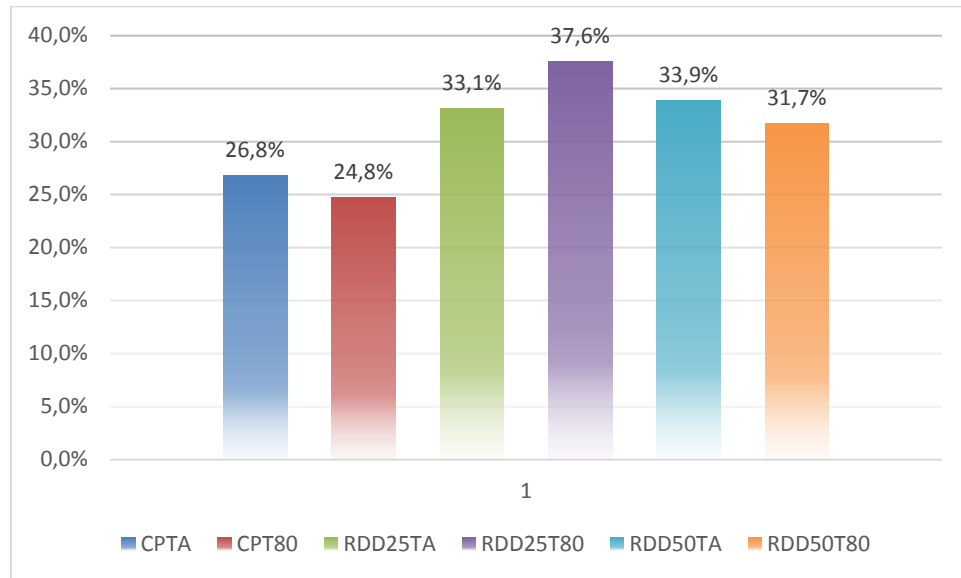
Fuente: Autor del Proyecto

Tabla 23. Porcentajes de la pérdida de resistencia a la compresión por el ataque con MgSO₄.

DIAS	CPTA	CPT80	RDD25TA	RDD25T80	RDD50TA	RDD50T80
28	26,8%	24,8%	33,1%	37,6%	33,9%	31,7%

Fuente: Autores del Proyecto

Figura 34. Diagrama donde se muestra la pérdida de resistencia al ataque con MgSO4



Fuente: Autores del Proyecto

Nuevamente al comparar el residuo de demolición con la puzolana, el factor temperatura genera beneficios para los morteros en cuanto a su resistencia. El residuo de demolición entre mayor es el tiempo de sometimiento a sulfatos mayor es la pérdida de resistencia de las probetas. Caso contrario ocurre con el granito y

el ladrillo ya que la resistencia mejora en la mayoría de las pruebas. Tablas 25 y 26.

Tabla 24. Ataques con sulfatos para probetas con PuzolanaAtaque con MgSO₄.

Semanas	CPOANL MPa	CPOAL MPa	GANL MPa	GAL MPa	GANL65 MPa	GAL65 MPa
1	24,12	25,38	18,68	18,82	19,44	19,6
2	23,1	23,98	17,56	18,58	18,6	19,4
3	21,8	22,64	17,84	18,16	18,4	18,2
4	19,8	21,06	17,32	17,26	17,64	18,04
9	18,32	19,96	15,6	17,1	15,6	17,3

Fuente: Tomado de la tesis de Hernando Álvarez

Tabla 25. Ataques con sulfatos para probetas con granito y ladrillo

Días	CGALTA MPa	CGANLTA MPa	CLALTA MPa	CLANLTA MPa	GALTA MPa	GANLTA MPa	LALTA MPa	LANLTA MPa
7	26,4	16,0	24,5	17,5	7,5	7,4	15,6	12,8
14	28,1	16,5	25,5	23,5	7,4	5,2	16,9	12,3
21	27,2	15,4	38,4	27,2	7,2	5,9	15	17,8

Fuente: Tomado de la tesis de Fabiola Coronado y Paola Flórez

4.4.3. Ataque con ácidos. Después de 21 días de curado, 9 probetas de cada una de las diferentes mezclas fueron introducidas en una solución de ácido sulfúrico, esta solución posee un pH de 1. A las probetas sumergidas en dicha solución les fue evaluado lo siguiente: resistencia a la compresión, cambio de masa y variación en la longitud de los lados luego de ser sumergidos en ácido durante un periodo de 1, 2, 3, 4 y 9 semanas, cabe destacar que para cada día de prueba se usaron dos probetas de cada mezcla. Las probetas CPTA y CPT80 presentan una pérdida de resistencia leve durante la primera semana, entre la segunda y la tercera semana es donde se ven más afectados estos morteros y donde más decae su resistencia a la compresión, luego de este tiempo la

tendencia es seguir disminuyendo de forma casi constante. Las muestras de mortero geopolimérico mostraron un comportamiento muy similar a las de cemento portland, la primera semana muestra muy poca pérdida de resistencia, pero en el transcurso de la segunda y tercera semana hay un decaimiento significativo, después de la tercera semana la pérdida de resistencia a la compresión se mantiene prácticamente constante. Después de la exposición en la solución de ácido sulfúrico durante 9 semanas, la pérdida de resistencia a la compresión se encontró del 37,09% y 35,14% para las mezclas de OPC ANL y OPC AL respectivamente; para las mezclas geopoliméricas fue de 9,55%, 8,24%, 11,4% y 9,84 GANL, G AL, G65 ANL y G 65 AL respectivamente.

Tabla 26. Promedio de la resistencia a la compresión de las diferentes probetas sometidas a ataque con H₂SO₄.

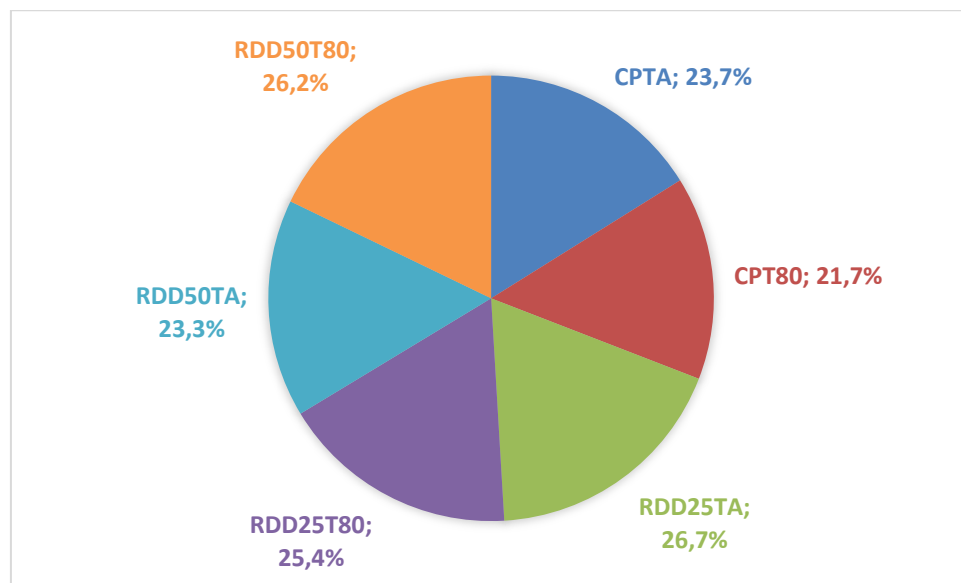
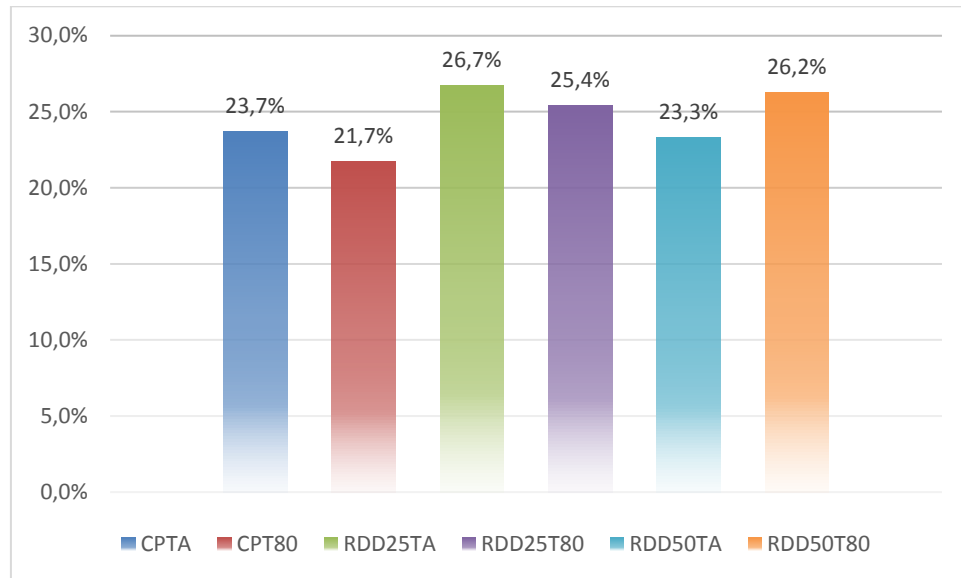
SEMANAS	CPTA	CPT80	RDD25T80	RDD25TA	RDD50T80	RDD50TA
1	26,5	27,8	24,1	22,3	23,98	22,71
2	25,9	26,4	22,65	21,8	22,77	21,84
3	20,8	21,78	19,87	18,65	18,84	17,56
4	20,56	21,45	19,02	17,96	18,43	17,46
9	17,8	18,95	18,94	17,6	17,8	16,76

Tabla 27. Porcentajes de la pérdida de resistencia a la compresión por el ataque con MgSO₄.

DIAS	CPTA	CPT80	RDD25TA	RDD25T80	RDD50TA	RDD50T80
28	23,7%	21,7%	26,7%	25,4%	23,3%	26,2%

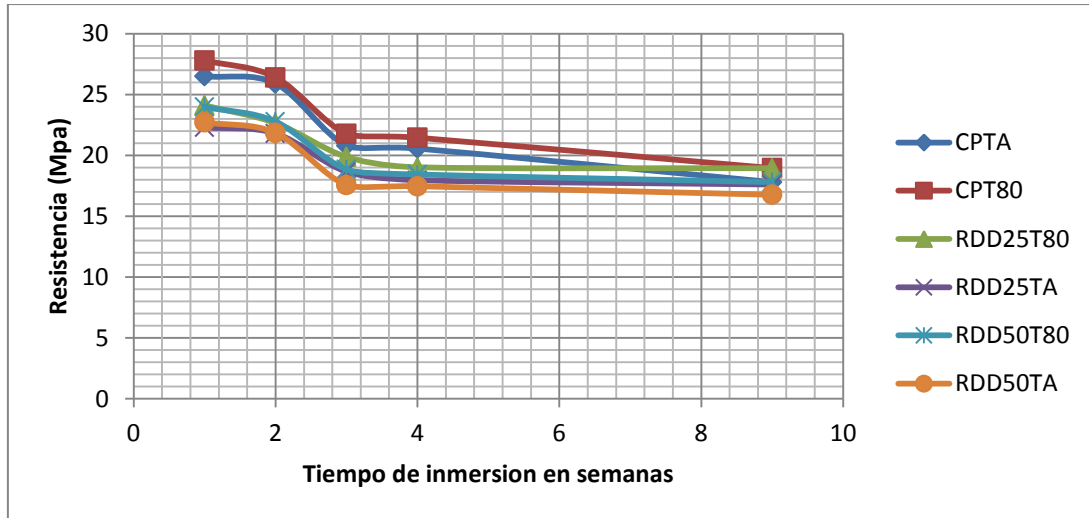
Fuente: Autores del Proyecto

Figura 35. Diagrama donde se muestra la pérdida de resistencia al ataque con H₂SO₄.



Fuente: Autores del Proyecto

Figura 36. Resistencia al ataque de ácidos



Fuente: Autores del Proyecto
Ataque con ácidos:

Morteros sometidos a temperaturas diferentes a la temperatura ambiente siguen presentando mejores resultados. Al igual que el ataque con sulfatos los ácidos también juegan un papel importante en el deterioro de los morteros, entre más tiempo están sometidos a los ácidos menor es su resistencia.

Tabla 30. Ataque con ácidos para probetas de puzolana

Semanas	CPOANL MPa	CPOAL MPa	GANL MPa	GAL MPa	GANL65 MPa	GAL65 MPa
1	24,86	27,08	18,76	19,08	19,44	19,2
2	22,71	23,28	18,7	18,56	18,84	19,36
3	19,44	20,72	18,64	18,28	18,28	18,28
4	18,22	19,96	17,8	18,48	17,24	17,76
9	16,48	18,16	16,1	17,8	16,1	17,85

Fuente: Tomado de la tesis de Hernando Álvarez

Tabla 281. Ataque con ácidos para probetas de granito y ladrillo

Días	CGALT	CGANLTA	CLALTA	CLANLTA	GALTA	GANLTA	LALTA	LANLTA
	A	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	MPa							
7	24,3	17,3	19,4	13,9	2,6	4,7	18,8	15,6
14	28,7	18,0	21,1	11,8	2,9	3,7	16,2	12,0
21	27,2	13,8	25,4	11,4	3,7	3,9	12,0	7,8

Fuente: Tomado de la tesis de Fabiola Coronado y Paola Flórez

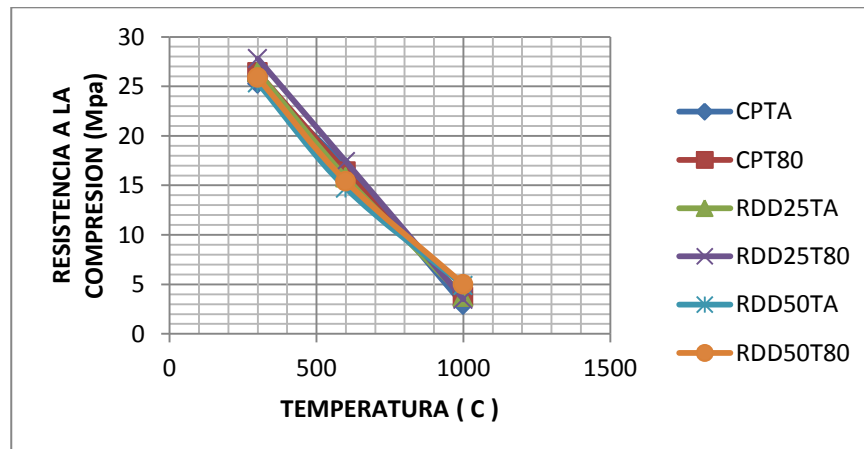
4.4.4. Comportamiento a altas temperaturas. Probetas sometidas a altas temperaturas.

Tabla 292. Promedio de la resistencia a la compresión de las diferentes

Temperaturas	CPTA	CPT80	RDD25TA	RDD25T80	RDD50TA	RDD50T80
300	25,27	26,40	26,45	27,8	25,35	25,88
600	16,8	16,4	15,82	17,4	14,72	15,41
1000	2,94	3,75	3,75	3,5	4,88	5,02

Fuente: Autores del Proyecto

Figura 37. Comportamiento a altas temperaturas



Fuente: Autores del Proyecto

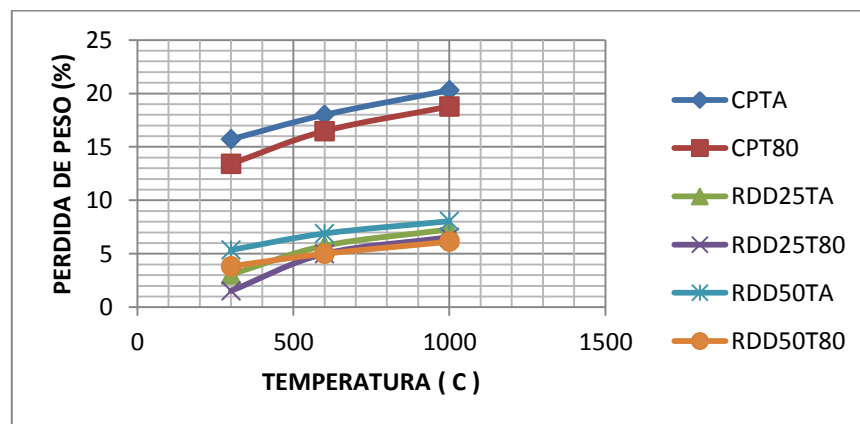
Como se puede observar en la figura 37, las probetas geopoliméricas sometidas a temperaturas de 80°C presentaron un comportamiento mecánico un poco más estable frente a las altas temperaturas que las probetas de CP. En la tabla 26 podemos observar que los morteros de CPTA presentaron pérdidas en la resistencia hasta del 89% de la resistencia inicial expuesto a 1000°C, los morteros de CPT80 presentaron pérdidas de hasta el 86%, los morteros RDD25TA hasta del 87%, RDD25T80 hasta del 84%, RDD50TA hasta del 79% y finalmente los morteros RDD50T80 con también el 79%. A continuación se exponen los porcentajes de pérdida de peso en la Tabla 30.

Tabla 303. Porcentajes de pérdida de peso de las probetas por altas temperaturas

	300	600	1000
CP T AMB	15,71%	18%	20,3%
CP T 80	13,41%	16,48%	18,78%
R 50 T AMB	5,36%	6,9%	8,05%
R 50 T 80	3,84%	5%	6,13%
R 25 T AMB	3,06%	5,75%	7,28%
R 25 T 80	1,53%	5%	6,55%

Fuente: Autores del Proyecto

Figura 38. Pérdida de peso de las probetas por las altas temperaturas expresado en porcentaje



Fuente: Autores del Proyecto

La pérdida de peso para las probetas se determinó en cada rango de temperatura a las que fueron sometidas; se comparó con su peso inicial para así expresar estos valores en porcentajes. La pérdida de humedad inicial de las probetas CPTA Y CPT80 sometidas a 300°C vario entre el 13% y el 15%, para las de RDD25TA Y RDD25T80 vario entre el 1% y el 3% y finalmente para las probetas de RDD50TA y RDD50T80 el porcentaje estuvo entre 4% y el 5%, este se debe a la perdida de agua capilar. De los 600°C a los 1000°C las probetas CPTA Y CPT80 variaron del 18% al 20%, las de RDD25TA Y RDD25T80 variaron del 5% al 7% y las de RDD50TA Y RDD50T80 perdieron alrededor del 6% al 8% de su peso inicial; la pérdida de peso en las temperaturas de 600°C a 1000°C grados se debe a la deshidratación de minerales arcillosos presentes en las probetas y la liberación de CO₂. Las probetas geopoliméricas presentan resultados más favorables frente a las altas temperaturas que las realizadas con cemento portland ordinario ya que su disminución en cuanto a resistencia a la compresión y peso inicial es menor

Tabla 314. Ataques con altas temperaturas para probetas de puzolana

Temperatura	CPOANL MPa	CPOAL MPa	GANL MPa	GAL MPa	GANL65 MPa	GAL65 MPa
300	25,18	26,02	18,82	19,1	18,92	19
600	15,1	16,34	14,62	15,25	14,2	15,2
1000	2,74	3,7	5,3	6,45	4,88	6,12

Fuente: Tomado de la tesis de Hernando Álvarez

Cuando los morteros son sometidos a altas temperaturas la disminución de resistencia es completamente superior que cuando fueron sometidos a los ataques con ácidos y sulfatos, como se puede observar en las tablas de resultados, al incrementar la temperatura la resistencia decae notoriamente a tal punto que para los 1.000 C prácticamente el mortero está en muy malas condiciones.

5. CONCLUSIONES

El residuo de demolición utilizado como material de partida corresponde a un conglomerado polimictico, con una matriz de material sericítico y calcáreo con abundantes fragmentos de cuarzo y de roca de los tres tipos. En su gran mayoría son metasedimentarios tipo metaconglomerado, chert, subarcosa, metaigneos como la granodiorita y metamórficos como un esquisto cuarzomicáceo y cuarcita.

De acuerdo a estudios sobre petrografía del hormigón, las areniscas, las granodioritas, el chert presentes en la muestra se constituyen en áridos duraderos y resistentes a la meteorización. Aunque pueden estar contaminados por arcillas y limos. La presencia de vidrio volcánico que se está alterando a arcilla puede afectar la adhesión al cemento debido a sus propiedades expansivas en contacto con el agua. Es importante anotar que desde el punto de vista microscópico no se observa evidencia de una reacción álcali – sílice ya que presenta bordes definidos. Y además en ningún momento se observan minerales neoformados por reacciones entre el Na – K y los fragmentos de roca. Hay muy pocos elementos alcalinos como el K, solamente los que están presentes en las micas.

Del análisis elemental por FRX se puede observar que la gran cantidad determinada de Silicio (Si) y Aluminio (Al) en el residuo de concreto se encuentra en parte presente en las fases cristalinas: cuarzo y plagioclasa, principalmente. La naturaleza silicatada del residuo de concreto es justificada en la absoluta predominancia del compuesto SiO_2 (78,5% en la matriz y 91,5-97,8% en los agregados). El contenido de Al_2O_3 varía de 12,5% en la matriz a 1,9-4,1% en los agregados.

La caracterización mineralógica por DRX del residuo de demolición revela que este material está compuesto principalmente por las fases cristalinas cuarzo bajo (SiO_2), calcita (CaCO_3), albita alta ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), dickita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) y portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que de acuerdo a (Guirado y Servando, 2000) la portlandita es una fase mineral que se forma en la hidratación de los silicatos cálcicos.

En el ensayo de resistencia a la compresión, las probetas curadas a 80°C durante 24 horas presentan una resistencia a la compresión mayor que la de las probetas geopoliméricas curadas a temperatura ambiente.

En el ataque de sulfatos las probetas geopoliméricas disminuyeron notablemente su resistencia a la compresión debido a la interacción fisicoquímica en la cual se ven involucrados los minerales que hacen parte de la pasta de cemento y los iones de sulfato presentes en la solución en la cual fueron sumergidas las probetas. Adicionalmente se generaron grietas, pérdida de peso y desintegración de los morteros generalmente en los bordes. En cuanto al porcentaje de pérdida en peso fue del 27% para las probetas CPO y de 33% para las probetas geopoliméricas.

Para el ensayo de ataque de ácidos, sufrieron menor porcentaje de pérdida en peso las probetas geopoliméricas un promedio del 9 % y las de CPO con un 36 %. Las probetas geopoliméricas presentan resultados más favorables frente a las de altas temperaturas que las realizadas con cemento portland ordinario ya que su disminución en cuanto a resistencia a la compresión y peso inicial es menor.

6. RECOMENDACIONES

La evaluación del concreto con métodos petrográficos proporciona información valiosa sobre su composición, condición y desempeño potencial, por lo tanto un examen petrográfico, realizado en conformidad con la norma, ASTM C856 produce el análisis inicial más rentable cuando las propiedades del material están en duda. Sería conveniente realizar otros trabajos con un número de secciones delgadas que permiten establecer más detalladamente la transformación mineralógica del material precursor. De igual manera incluir la utilización de otras técnicas como la microscopia electrónica de barrido, espectroscopia infrarroja, etc., otros residuos de construcción y/o demolición. En el caso del ataque de sulfatos utilizar ácido acético.

El mundo de hoy buscando satisfacer sus necesidades, está continuamente desarrollando nuevas tecnologías que reduzcan el procesamiento de materiales a un menor costo, buscando minimizar el impacto ambiental, los geopolímeros se constituyen en uno de los sustitutos más importantes en la elaboración del cemento debido a sus propiedades como su resistencia mecánica y estabilidad frente a medios agresivos y sus bajas emisiones de CO₂.

El residuo de demolición y/o construcción dispuesto en las escombreras podría ser utilizado en obras de urbanismo y escenarios deportivos que puedan cumplir con las especificaciones técnicas requeridas.

BIBLIOGRAFÍA

ALEGRE, E; Sánchez; L; Robles; V. Clasificación de residuos de construcción y demolición utilizando descriptores de textura. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad de León. España. (2005).

ALLAHVERDI, E; Najafi, K; Construction Wastes as Raw Materials for Geopolymer Binders.(2008)

ARANGO, A; Mecánica de Suelos. Universidad Nacional de Colombia. Seccional Medellín. Cap. 3. p. 40 – 50, (1987).

ASTM AméricaStandar Materials.Especificación150 – 81.

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

BAKHAREV, T; Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions, Cement and Concrete Research 35, 1233- 1246, (2004).

BELEÑA, M; Tendero, E; M, Tamayo, D; Estudio y optimización de los parámetros de reacción para la obtención de material geopolimérico. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio, (2003).

BIANCHINI,G; Marrocchino, E; Tassinari, R; Vacaro; Recycling of construction and demolition waste material: a chemical – mineralogical appraisal,(2004).

BOSSINK, B. Brouwers, H., Construction waste: quantification and source evaluation. Journal of Construction Engineering and Management 122.Pág.55-60.

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

CONCRETO. Serie de conocimientos básicos. Revista N° 1. ASOCONCRETO. Instituto Colombiano de productores de cemento.

CORCINO, V. Estudio comparativo de concreto simple y reforzado de acero dramix y wirand empleando cemento. Universidad Ricardo Palma. Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Lima – Perú. (2007).

CORONADO, F; Flórez, P; Estudio comparativo de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros usando granito y residuos de la industria ladrillera como materia prima alternativas al cemento portland tipo I. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Fisicoquímicas. Escuela de Geología, (2010).

DAVIDOVITS, J; Chemistry of geopoliméric systems, terminology, in The proceedings of Geopolymere ' 99, St. Quentin, France, 9 – 39, (1999).

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

DAVIDOVITS, J; From Ancient Concrete to Geopolymers, Adapted from Arts etMétiers Magazine N° 180, (1993).

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

DAVIDOVITS, J; Comrie, D ;Geopolymeric reactions in archaeological cements and in modern blended cements”. Proceedings of First European Conference on Soft Mineralurgy, pp. 93-106, (1988).

DAVIDOVITS, J; Mineral polymers and methods of making them, US Patent 4349386, 1982.

Disponible en [http : // www.geologia.uson.mx](http://www.geologia.uson.mx). Departamento de Geología de la Universidad de Sonora (Mexico).

Disponible en [http : // www.synsa.com](http://www.synsa.com).

DUXSON, P Fernandez, J; Provis, J; Luckey, C ;Palomo, A; Van Deventer, J; Geopolymer technology: the current state of the art. Advances in geopolymer science & technology. (2003).

FERNANDEZ, J; Garcia-Lodeiro, L; Palomo, A; Durability of Alkali Activated Fly Ash Cementitious Materials, Journal of Materials Science, V. 42.106–112. (2007).

GUIRARDO, F; Servando, J; Petrografía del hormigón. Atlas de minerales. Universidad Politecnica de Madrid. (2000).

INVE-123 Análisis granulométrico por tamizado de agregados finos.

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

KHALE, D and Chaudhary, R; Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing its Development: a review, Journal of Materials Science, V. 42. (2007).

KOSMATKA, H; Diseño y control de mezclas de concreto. USA Portland Cement Association. (2004)

LAMPRIIS, C; Lupo, Cheeseman C, Geopolymerisation of silt generated from construction and demolition waste washing plants Original Research Article. Waste Management, Volume 29, Issue 1, 368-373. (2009).

LAURITZEN, E. K., Economic and environmental benefits of recycling waste from the construction and demolition of building. Waste Recycling, UNEP Industry and Environment. Pág. 26 – 31. (1994).

MANTILLA, H ; Síntesis y caracterización de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Fisicoquímicas. Escuela de Geología, (2010).

MANUAL DEL INGENIERO CIVIL. Tomo I. Mac Graw Hill: México. sección 5-6.

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

MORAL, F.J. La representación gráfica de las variables regionalizadas. Geoestadística lineal. Servicio de publicaciones de la Universidad de Extremadura, Badajoz, España. (2003)

NORMA ICONTEC 174. Especificaciones de los Agregados para Concreto. Cuarta Revisión.

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

NORMA ICONTEC 221. Método de ensayo para determinar el peso específico del cemento hidráulico

NORMA ICONTEC 226. Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico sobre los tamices (Icontec 74 μ y 149 μ .)

NORMA ICONTEC 237. Método para determinar el peso específico y la absorción de agregados finos.

NORMA ICONTEC 31. Definiciones de cemento.

NORMA ICONTEC 77. Tamizado de materiales (agregados o áridos).

PACHECHO, F; Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder. Construction and Building Materials. Magazin N°22. (2008).

PALOMO, A; Fernandez, A; Kavalchuk, G; Activación alcalina de cenizas volantes. Relación entre el desarrollo mecánico resistente y la composición química de la ceniza. Materiales de Construcción. Vol. 58,1323–1329. (2008).

PALOMO, A., Alonso S. Estudio calorimétrico de activación alcalina de mezclas de hidróxido de calcio y metacaolín. Investigación de cementos y concretos. Vol. 31, pp. 25-30. (2001).

PALOMO, A., Alonso S., Fernández J.A., Sobrados I., Sans J, Activacion alcalina de cenizas volantes (1999).

SKOOG, D; Holler, F. y Nieman T. A. Principios de análisis instrumental. Editorial McGraw Hill. Quinta edición. Madrid,. p. 291-317. (2001)

VAN JAARSVELD, J; Van Deventer, J, Luckey, G. The effect of composition and temperature on properties of fly ash and Kaolinite-Based geopolymers: J. Chem. Eng. V. 89,63–73.(2002).

XU, H; Van Deventer, J; The geopolymerisation of aluminio-silicate minerals: Int. J. Miner. Process. V. 59, 1131–1139. (2000).