

**CARACTERIZACION DE AGREGADOS PETREOS DE LA CANTERA
TRITUPISVAR PARA SU USO EN LA ELABORACION DE CONCRETO, SANTA
MARTA COLOMBIA**

**ANDREA GONZALEZ RUIZ
EDWIN ALEXANDER VILLA PLAZAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICA
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2012**

**CARACTERIZACION DE AGREGADOS PETREOS DE LA CANTERA
TRITUPISVAR PARA SU USO EN LA ELABORACION DE CONCRETO, SANTA
MARTA COLOMBIA**

**ANDREA GONZALEZ RUIZ
EDWIN ALEXANDER VILLA PLAZAS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de
GEÓLOGO**

**DIRECTOR
CARLOS ALBERTO RIOS REYES
Geólogo PhD en Ciencias Aplicadas**

**CODIRECTOR
LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ
MSc. Ingeniera Metalúrgica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICA
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

A ti, Señor Jesús, Dios Todo Poderoso.

Por permitirme haber nacido y crecido en tu conocimiento y ser participe de tus infinitas bendiciones a través de los años. Es por tu Gracia, bondad y amor que me has dado la fortaleza y la salud para culminar mi carrera profesional.

A ti, Madre

Por haberme apoyado en todo momento, gracias por todo tu esfuerzo por tus consejos, tus valores, por la confianza que depositaste en mi y la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por tu amor incondicional.

A ti, Hermano

Por estar siempre presente, cuidándome brindándome tu apoyo, cariño, comprensión y paciencia.

A ti, Tía

Por ser una segunda madre, por tu perseverancia, constancia y valor mostrado para salir adelante que siempre has inculcado en mí y por tu amor.

Andrea González Ruíz

Este trabajo se lo dedicó a los que siempre han estado y estarán conmigo, a mis padres Elizabeth y Carlos y a mis hermanos, Carlos, Emerson y Víctor, a mis sobrinos Kevin, Juan Diego y María Paula.

Que por ellos han sido todas mis metas.

Edwin Alexander Villa Plazas

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a mis padres Elizabeth y Carlos porque siempre me han dado ese apoyo desde la infancia hasta ahora, quiero decirles que los quiero y que este otro triunfo es por ustedes y por mí. A mis hermanos que voz de aliento, superación y confianza. Y mis sobrinos que los quiero mucho.

Les agradezco a todas las personas que siempre me dieron ese apoyo incondicional y estuvieron ahí en mi formación como profesional; La señora Rosalba, Isabel, Mery, Celina, Gloria y Marlene.

A mi compañera de tesis Andrea, por que fuimos muy afortunados de conocernos y hacer parte de este proyecto, porque nos entendimos muy bien y porque no hubiera dado resultado si no estuviéramos los dos.

A todos mis amigos, compañeros y profesores de la Escuela de Geología, formaron parte de esta aventura y siempre quedaran en mis recuerdos.

Gracias

Edwin Alexander Villa Plazas

Primeramente dar gracias al Señor Jesús, por estar conmigo en cada paso que doy, por darme entendimiento y llenarme de sabiduría. Porque puso en mi vida a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante este proceso de formación personal como profesional.

Agradecer hoy y siempre con todo mi corazón a mi mamá Gladys, a mi hermano Daniel y a mi tía Rosalba quienes desde un principio hasta el día de hoy me han apoyado, acompañado incondicionalmente y brindado su amor, paciencia, consejos, ánimo y alegría.

A mi compañero de tesis Edwin, por tener la fortuna de conocerlo y desarrollar una amistad y empatía que nos permitió trabajar en equipo y lograr juntos la finalización de este proyecto

A todos mis amigos, compañeros y profesores de la Escuela de Geología, por su receptividad y apoyo en este proceso de formación integral. Siempre quedaran en mis recuerdos.

Gracias a todos

Andrea González Ruíz

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	22
1. OBJETIVOS	24
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	24
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
2. ANTECEDENTES	25
3. MARCO TEORICO.....	29
3.1 CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO.....	30
3.2 CLASIFICACIÓN POR SU ORIGEN	31
3.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU FORMA	31
3.4 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU DENSIDAD.....	33
3.5 ROCAS ÍGNEAS	35
3.6 ROCAS SEDIMENTARIAS	37
3.7 ROCAS METAMÓRFICAS.....	40
3.8 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS	41
3.8.1. Propiedades Mineralógicas y Petrográficas del Agregado.....	42
3.8.1.1. Descripción de los minerales	42
3.8.1.2. Examen petrográfico	45
3.8.1.3 Importancia y uso	45
3.8.1.4 Toma de muestra.	47
3.8.2 Propiedades Físicas del Agregado.....	47
3.8.2.1. Granulometría, Norma Icontec 77 (ASTM C-33).....	48

3.8.2.2. Contenido de Materia Orgánica, Norma Icontec 127 (ASTM C-40).....	51
Fuente: Tomado de Norma Icontec -127	51
3.8.2.3. Determinación de Peso Unitario, Norma Icontec 92 – ASTM C29.....	52
3.8.2.4. Determinación de Peso Especifico y absorción de agregados gruesos, Norma Icontec 176 – ASTM C127	52
3.8.2.5 Determinación de Humedad, Norma Icontec 1776 (ASTM C-566)	52
3.8.2.6. Determinación de la resistencia de los agregados a los ataques con sulfato de magnesio Norma Icontec 126 (ASTM C-88)	54
3.8.3. Propiedades Mecánicas del Agregado.....	54
3.8.3.1 Muestra de ensayo	55
3.8.4. Propiedades Químicas de los Agregados	56
3.8.4.1 Reacción Álcali-Carbonato	56
3.8.4.2. Reacción Álcali-Silicato	57
3.8.4.3 Reacción Álcali-Sílice (ASR)	57
3.8.4.4 Factores que afectan a la reacción	59
3.8.5 Elaboración de Concreto para Determinar Resistencias a la Compresión.	63
4. METODOLOGIA.....	64
4.1 FASE DE REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	64
4.2 FASE DE CAMPO	64
4.3 FASE DE PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	65
4.4 FASE DE CARACTERIZACIÓN.....	66
4.4.1. Procedimiento para el ensayo de la Norma ASTM C295.....	67
4.4.2 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 77 (ASTM C-33).....	68
4.4.3 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 92 (ASTM C-33).....	69
4.4.4. Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 176 (ASTM C-127).....	71
4.4.5 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 126.....	72

4.4.6 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 127.....	75
4.4.7 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 1776.....	76
4.4.8 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 98 (ASTM C-131).....	77
4.4.9 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 175 (ASTM C-289).....	79
4.4.10 Procedimiento para la preparación del concreto.....	80
4.5 FASE DE INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	84
4.6 FASE DE ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL.....	85
5. RESULTADOS.....	86
5.1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA CANTERA TRITUPISVAR.....	86
5.2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	86
5.3 LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA REGIONAL.....	88
5.4 GEOLOGÍA LOCAL DE LA CANTERA TRITUPISVAR.....	90
5.5 ANÁLISIS PETROGRÁFICO.....	95
5.5.1 Descripción en muestra de mano. Se presenta en las tablas 20 Y 21 la descripción macroscópica de las rocas analizadas.....	95
5.5.2. Descripción en sección delgada.....	96
5.6 RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 77.....	101
5.6.1 Agregado Grueso muestras SM-1 y SM-2.....	101
5.7. RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 92 (ASTM C-33).....	104
5.8. RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 176 (ASTM C-127).....	105
5.9. RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 126.....	107
5.10. RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 127.....	107
5.11. RESULTADO DE LA NORMA ICONTEC 1776.....	108
5.12. RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 98 (ASTM C-131).....	108
5.13. RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 175 (ASTM C-289).....	109

5.14. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN	111
5.15 RESUMEN DE LOS ENSAYOS APLICADOS A LAS MUESTRAS	115
6. CONCLUSIONES.....	118
7. RECOMENDACIONES	122
BIBLIOGRAFIA	124

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Secuencia de la reacción álcali-sílice en el concreto.....	59
Figura 2. Reacción entre los iones hidroxilos y sodio o potasio y la estructura cristalina del mineral.	60
Figura 3. a) Bloques de roca a analizar. b) Tamaño de las rocas partidas con una porra de 16 libras. c) Maquina de trituración de mandíbulas BB 200 RESTSCH y proceso de trituración de las muestras para obtener un tamaño promedio de 19 mm. d) Material triturado.	66
Figura 4. a) Análisis petrográfico en el microscopio de luz transmitida marca Nikon y toma de fotos de los minerales presentes.....	67
Figura 5. a) Tamices 1", ¾", 3/8", No4, No 8 en forma descendente. b) y c) Proceso de tamizado para cada muestra. c) Material retenido en cada tamiz.....	68
Figura 6. a) Peso del medidor vacío, del medidor vacío con vidrio y peso del medidor con agua y vidrio. b) y c) Método suelto para determinar peso unitario. d) y e) Método de apisonado para determinar peso unitario. f) Se pesa cada tipo de roca triturada tres veces y se saca promedio.	70
Figura 7. a) Material sumergido en agua durante 24 horas para eliminar polvo o material adherido a sus superficies. b) Procedimiento para secado del material para eliminar las películas de agua superficiales. c) Canasta de alambre que va a ser sumergida en agua para su toma de peso. d) Peso de cada roca triturada sumergida en agua.	72
Figura 8. a) Después del periodo de inmersión se coloca en el horno por cinco horas. b) Las muestras se dejan enfriar a temperatura ambiente para luego pesarlas.	74
Figura 9. a) Solución de hidróxido y tabla colorimétrica. b) Después de 24 horas se observa que las muestras no presentan afectación según la tabla colorimétrica.	75

Figura 10. a) Las muestras se secan al horno por 24 horas. b) Muestras secadas a temperatura ambiente. c) Se pesa las muestras.....	76
Figura 11.a) Maquina de los ángeles. b) Esferas utilizadas en el ensayo. c) Se enciende la maquina una vez introducidos las esferas, el material y sellada a una velocidad de 1000 revoluciones. d) Tamiz No12. e) y f) Se tamiza cada muestra con el tamiz No12 y el material retenido en este se pesa para determinar el porcentaje de desgaste.....	78
Figura 12. a) Cada muestra se pulveriza en la trituradora de mandíbulas BB 200 RESTSCH, se pasan por un tamiz No 200. b) y c) Se depositan 30 g de cada muestra en un recipiente plástico y se pesa cada una.	79
Figura 13. a) Se observa la mezcla de la arena, agregado y agua con el cemento. b) Los moldes de PVC son cubiertos con ACPM. c) y d) Llenado de los moldes. e) Los moldes se dejan en un lugar seco y plano para su curado de un día. f) Se ajustan los cilindros a la máquina. g) Se inicia el proceso de compresión. h) Todos los cilindros ensayados.....	83
Figura 14. Esquema que muestra la localización regional y local del área de estudio.	87
Figura 15. Vías de acceso a la Cantera. Imagen Tomada de Google Earth.....	88
Figura 16. Mapa geológico de la Sierra Nevada de Santa Marta, en el cual se observan las principales provincias geotectónicas, y el área de estudio aproximada.	89
Figura 17. a) Panorámica de la bahía de Santa Marta. b) Esquistos anfíbolicos micáceos c) esquistos anfibólicos con esquistos anfibólicos biotíticos con lentes cloríticos e intrusiones concordantes con la foliación. d) Esquistos anfibólicos intruidos concordantemente por dique monzogranítico. e) Dique granodiorítico. f) esquistos biotíticos con lentes cloríticos e intrusiones concordantes con la foliación.....	90
Figura 18. g) Esquistos anfibólicos. h) Intercalación de esquistos anfibólicos y micáceos con presencia de un lente no mayor a 50 cm. de espesor de esquisto actinolíticos. i) Afloramiento donde antiguamente se explotaba talco. j)	

Granodiorita que hace parte del Batolito de Santa Marta con presencia de una vena de cuarzo que la corta. k) Esquistos actinolíticos con presencia de talco. l) venas de magnesita. m)y n)) Frente de explotación de la cantera.....	93
Figura 19. Microfotografías de la muestra SM-1 tomadas en XPL y a la derecha en PPL. En a) y b). Cristales de Plagioclasa, Hornblenda, Esfena, Zoisita y Cuarzo (Aumento 10x). En c) y d) Venillas de cuarzo y dirección de esquistosidad señalado con la flecha negra (Aumento 5x). En e) y f) Alteración de la hornblenda a sericita (Aumento 10x).	98
Figura 20. Microfotografías de la muestra SM-2 tomadas con XLP y a la derecha PPL. En a) y b). Cristales de Cuarzo, Plagioclasa, Mica Moscovita (Aumento 10x). En c) y d). Cristales de Ortoclasa, cuarzo y plagioclasa (Aumento 10x). En e) y f). Cristales de Ortoclasa y Plagioclasa (Aumento de 10x).	100
Figura 21. Curva granulométrica de agregado grueso muestra Anfibolita	102
Figura 22. Grafica análisis granulométrico muestra SM2 (Pegmatita)	103
Figura 23. Resistencia a la compresión del material de agregado grueso de anfibolita, SM-1	111
Figura 24. Resistencia a la compresión del material de agregado grueso de Pegmatita, SM-2.	113
Figura 25. Resistencia a la compresión del material de agregado grueso de la mezcla de anfíbol y pegmatita.	115

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación general del agregado según su tamaño.....	30
Tabla 2. Clasificación de las partículas según su forma	32
Tabla 3. Clasificación de la textura superficial de los agregados.....	33
Tabla 4. Clasificación del agregado según su densidad.....	34
Tabla 5. Composición de las rocas ígneas y características como agregados pétreos.....	36
Tabla 6. Composición de las rocas sedimentarias y características como agregados pétreos.....	39
Tabla 7. Composición de las rocas Metamórficas y características como agregados pétreos.....	40
Tabla 8. Minerales Reactivos.....	46
Tabla 9. Determinación de la granulometría de agregados para concreto	48
Tabla 10. Límites de granulometría para el agregado fino	49
Tabla 11. Clasificación de la arena por su módulo de finura	50
Tabla 12. Límites de sustancias dañinas en agregados para hormigón.	51
Tabla 13. Cantidad de material en unidades de peso para realizar el cuarteo en el ensayo de contenido de humedad	53
Tabla 14. Tipo de abrasión según granulometría.....	56
Tabla 15. Resultados obtenidos en por Gaskin et al.....	58
Tabla 16. Masa requerida por tamaño de partículas.....	74
Tabla. 17. Resistencia solicitada y asentamiento o SLUMP	80
Tabla 18. Resultados obtenidos de los agregados	81
Tabla 19. Diseño de mezcla por metro cúbico de Concreto	81
Tabla 20. Análisis macroscópico de la muestra objeto de estudio SM-1.	95
Tabla 21. Análisis macroscópico de la muestra objeto de estudio SM-2.	96
Tabla 22. Granulometría del agregado grueso de Muestra SM-1 (Anfibolita).....	101

Tabla 23. Granulometría de agregado grueso Muestra SM–2 (Pegmatita)	103
Tabla 24. Procedimiento para calcular Peso Unitario suelto y compactado del agregado de las muestra SM-1(anfibolita) y SM-2(Pegmatita), sombreado en azul.	104
Tabla 25. Pesos específicos. La que se encuentra sombreada en azul es el peso a tener en cuenta en el diseño de mezcla.	105
Tabla 26. Determinación de Porcentaje de absorción y vacíos	106
Tabla 27. Determinación de la Resistencia de los agregados pétreos al ataque por sulfato de magnesio.....	107
Tabla 28.Determinación del peso seco en ambiente y del peso seco el horno ..	108
Tabla 29. Determinación del porcentaje de desgaste en las muestras.....	109
Tabla 30. Resultado porcentaje de sílice en la muestra SM-2 (pegmatita	110
Tabla 31. Resultado porcentaje de sílice en la muestra SM-1(Anfibolita).....	110
Tabla 32.Ensayo de compresión a la ruptura de muestra SM-1 (anfibolita) de concreto.	111
Tabla 33.Ensayo de compresión a la ruptura de muestra SM-2 (Pegmatita) de concreto.	113
Tabla 34. Ensayo de compresión a la ruptura de muestra Mixta de concreto	114

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACION DE AGREGADOS PETREOS DE LA CANTERA TRITUPISVAR PARA SU USO EN LA ELABORACION DE CONCRETO, SANTA MARTA COLOMBIA.*

AUTORES: ANDREA GONZALEZ RUIZ
EDWIN ALEXANDER VILLA PLAZAS**

Palabras Claves: Agregados pétreos, petrografía, anfibolita, pegmatita.

DESCRIPCION

El proyecto de investigación que se presenta a continuación contiene la evaluación de las características mineralógicas, petrográficas, físicas, mecánicas y químicas de los agregados pétreos que se extraen en la cantera Tritupisvar que se encuentra en la carretera Troncal del Caribe Km 6 vía Gaira en los alrededores del casco urbano de Santa Marta, Magdalena.

A dichas muestras se le sometió a un análisis completo comprendido bajo las normas Colombianas para materiales para concreto (ICONTEC) que son extraídas de las normas internacionales ASTM (por sus siglas en ingles). Para analizar las propiedades físicas del agregado (granulometría, densidad, peso unitario, entre otros) se utilizó la norma ASTM C-33 que especifica los requisitos generales que debe llenar un agregado. Las propiedades mecánicas se determinaron de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM C-131, denominada ensayo de desgaste por abrasión, y para conocer las propiedades químicas y mineralógicas (composición, contenido de sílice, minerales de alteración, partículas deleznable) se utilizó el examen petrográfico, según la norma ASTM C- 295 y el ensayo de reactividad potencial ASTM C-289.

Se presenta los resultados obtenidos de los respectivos análisis de los dos materiales traídos de la cantera para así determinar si los agregados reúnen las condiciones específicas para formar parte de la creación de concretos con cemento portland y poder utilizarlo en la industria de la construcción. Además se aportaron datos cualitativos y cuantitativos de las propiedades de dichos materiales aflorantes en la cantera Tritupisvar. Finalmente se incluyen las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología. DIRECTOR CARLOS ALBERTO RIOS REYES CODIRECTOR LUZ AMAPARO QUINTERO ORTIZ

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION OF ROCK AGGREGATES OF THE QUARRY TRITUPISVAR FOR USE IN THE PREPARATION OF CONCRETE, SANTA MARTA COLOMBIA*

AUTHORS: ANDREA GONZALEZ RUIZ
EDWIN ALEXANDER VILLA PLAZAS**

Keywords: Aggregates Stone, petrography, amphibolite, pegmatite

DESCRIPTION

This research project contains the evaluation of petrographic characteristics, physical, mechanical and chemical properties of stone aggregates extracted from the quarry Tritupisvar located in the Caribbean Trunk Road Km 6 Gaira around Santa Marta city, Magdalena.

Samples were subjected to complete analysis carried out under Colombian standards for concrete materials (ICONTEC) that are extracted from ASTM international standards. To analyze the physical properties of the aggregate (particle size, density, unit weight, among other) used to ASTM C- 33 which specifies the general requirements that must complete an aggregate. The mechanical properties were determined according to the specifications of ASTM C-131, called abrasive wear test or wear resistance, and to know the chemical and mineralogical petrographic examination was done (composition, silica, mineral alteration, friable particles), according to ASTM C-295 and reactivity potential ASTM C-289 test.

With the results obtained from the respective analyzes of two materials brought from the quarry it will be determine if the aggregates fulfill the specific conditions to form part of the creation of concrete and Portland cement to be used in the construction industry. Data were provided qualitative and quantitative properties of those materials outcropping in the Tritupisvar quarry. Finally, the conclusions and recommendations of the product under study are shown.

* Thesis of grade

** Faculty of physicochemical Engineering, School of Geology, DIRECTOR CARLOS ALBERTO RIOS REYES CODIRECTOR LUZ AMAPARO QUINTERO ORTIZ

INTRODUCCION

El concreto es un material pétreo artificial que se obtiene de la mezcla, en determinadas proporciones, de pasta (agua-cemento) y agregados que suelen representar entre el 70% y 80% del volumen del concreto, es decir, debe contar con un esqueleto pétreo empacado lo más densamente posible, y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos que éste deje (Palbol, 1996). Por lo tanto el agregado juega un rol importante al ser un componente dinámico dentro de la mezcla y sus características como la porosidad, granulometría, absorción de humedad, forma, textura, resistencia a la ruptura, módulo de elasticidad, su composición mineralógica tienen un efecto en el concreto (Mendoza, 2003).

En Colombia el consumo y demanda del concreto va en aumento, generando también la necesidad de contar con agregados que tengan un adecuado desempeño dentro de las mezclas ya que no todos son aptos para este fin, por esta razón conocer las propiedades petrográficas, físicas, mecánicas y químicas de los agregados, permite establecer el comportamiento que tendrán sobre la resistencia, estabilidad dimensional y durabilidad del concreto.

El presente estudio tiene como objetivo llevar a cabo la evaluación de las propiedades de los agregados presentes en el área de trabajo correspondiente a la cantera Tritupisvar que se encuentra sobre el macizo montañoso de la Sierra Nevada de Santa Marta, el cual está constituido por rocas de origen ígneo y metamórfico de edad Precámbrica hasta Cenozoica.

La influencia de las propiedades de estas rocas como agregados, merecen atención, es por ello necesario efectuar los ensayos respectivos para obtener

resultados confiables y satisfactorios sobre los aspectos físicos, mecánicos, petrográficos y químicos de los mismos de acuerdo a las Normas Icontec o Normas de la Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales ASTM (por sus siglas en inglés).

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Llevar a cabo la evaluación de las propiedades físicas, mecánicas, químicas y mineralógicas de agregados pétreos para determinar su calidad en la preparación de concreto, aplicando las normas ASTM.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio petrográfico macroscópico y microscópico de la roca con el fin de identificar y reconocer sus características mineralógicas.
- Analizar su composición mineral, así como sus rasgos estructurales y texturales.
- Conocer el comportamiento físico- mecánico del agregado
- Determinar las características químicas del agregado, para evitar efectos dañinos por la reactividad potencial a largo plazo.
- Concluir sobre la calidad de los materiales si son o no aptos como agregados pétreos para el concreto.

2. ANTECEDENTES

El empleo de materiales cementantes se da desde el inicio de la civilización cuando el hombre tuvo necesidad de construir su vivienda utilizando arcilla o una mezcla de cal y arena para unir las rocas y conformar una estructura simple que le sirviera de protección (Instituto del Concreto ,1997).

Hacia el año 500 A.C. los Griegos mezclaron compuestos basados en caliza calcinada (cal viva) y agua a la cual se adicionaba arena, para recubrir y unir rocas y ladrillos no cocidos, llegando a mencionarse que los palacios de Creso y Atala fueron construidos de esta forma. La adición a estas mezclas de roca triturada, teas rotas o ladrillo, dieron origen al primer concreto de la historia. Como los morteros de cal viva no resistían bien la acción del agua durante periodos largos, se presume que a esta mezcla se incorporaron toda clase de agregados y durante estas pruebas empíricas se descubrió que las arenas provenientes de ciertas rocas volcánicas tenían mayor resistencia y durabilidad tanto en aguas dulces como saladas (Instituto del Concreto ,1997).

Para obtener un buen desempeño del concreto en las construcciones es de gran ayuda conocer la naturaleza y estado de sus materiales constitutivos. Para esto existen diversas tecnologías encargadas de dar a conocer el estado y las potenciales propiedades de los agregados, cementos y adiciones que se van a utilizar en una determinada mezcla de concreto.

El microscopio petrográfico ha sido utilizado desde mediados del siglo XIX por los geólogos para entender e interpretar la génesis y mineralogía de las rocas mediante el uso de secciones delgadas. La aplicación de técnicas de microscopía

en el estudio del concreto (roca artificial hecha por el hombre), permitió desarrollar una nueva disciplina que se conoce como Petrografía del Concreto.

En 1904 the American Standard For Testing Materials (ASTM), publica por primera vez sus estándares de calidad para el cemento Portland, incluyendo los agregados pétreos.

En 1954, la norma ASTM C-295 de la petrografía de los agregados para concreto fue publicada, seguida por las normas C-856 de 1977 sobre el análisis petrográfico de concreto y c-1324 del año 2002 sobre petrografía del mortero.

Uribe (1991), elabora una tabla donde se presenta información sobre el origen, características físicas distintivas y su influencia en el concreto (cuando se utilizan como agregados), de las 3 familias de rocas conocidas, que son: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Gaitán (1996), efectúa un estudio de los componentes minerales de tres bancos de agregado que se utilizan a la ciudad de Guatemala, con base en lo dictaminado por las normas ASTM C-33 y C-295. Con esto se definieron propiedades físicas y también los componentes geológicos de cada muestra y se realizó una comparación de las muestras de agregados de diferentes fuentes.

Neville (1999), indica que los agregados se pueden calificar por su forma, con base en su grado de redondez y esfericidad, obteniéndose una medida relativa de carácter comparativo y descriptivo. Hace una clasificación desde el punto de vista de su tamaño, dividiéndolos en dos grupos: los agregados finos y los agregados gruesos. Los primeros consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que van desde 5 mm hasta mayores de 60 μm .; los segundos son aquellos cuyas partículas son mayores a 5 mm y hasta 125 mm.

El Instituto Mexicano del Concreto y del Cemento (2000), hacen una propuesta de evaluación de los agregados gruesos basada en sus características mecánicas, que involucra su litología y resistencia a la abrasión y al impacto. Consta de pruebas realizadas a materiales obtenidos de 25 lugares distribuidos en la república mexicana, se indica que tales propiedades de los agregados tienen su fundamento en el origen y tipo litológico de los mismos. Para evaluar la resistencia del agregado grueso a los procesos abrasivos, aplicaron como métodos de calificación la prueba de “Los ángeles” y la prueba de resistencia al impacto.

Chan et al. (2003), presenta una clasificación según origen, sus componentes mineralógicos y características texturales, estructurales y químicas de las rocas. Hacen insistencia en la absorción y densidad como propiedades del agregado que más influye en la consistencia del concreto, y de menor importancia mencionan la forma, tamaño y gradación del material pétreo. Y finalmente hacen una caracterización de las propiedades de la caliza según los criterios mencionados principalmente en el artículo.

Luna y Salguero (2004), analizan la calidad de agregados para la fabricación de concreto, en varias ciudades importantes de la república de Guatemala. Para determinar las propiedades físicas se aplicó la norma ASTM C-33, que brinda los requisitos generales que debe llenar un agregado que se pretende utilizar para fabricar concreto. Las propiedades mecánicas se determinaron con la norma “Ensayo de desgaste por abrasión” ASTM C-131, un tercer ensayo “Reactividad Potencial” ASTM C-289 y por último para conocer las propiedades químicas y mineralógicas se utilizó el examen petrográfico según la norma ASTM C-295.

Maya et al. (2006), presentan la elaboración de la cartografía sistemática de materiales de construcción. Comprende el análisis de las unidades de roca respecto a la caracterización litológica, localización y comportamiento

fisicoquímico para ser utilizadas como fuentes de agregados naturales. Se hace una síntesis de la normatividad existente en Colombia sobre estas materias primas.

Ramírez (2008), hace referencia de manera general que los agregados pétreos se clasifican en 3 grandes grupos: Depósitos aluviales, materiales de arrastre, las calizas, los ígneos y metamórficos. Expone las características industriales de cada grupo.

Alvarado (2010), hace un estudio de la morfología de los agregados pétreos comunes en el estado de Michoacán, México, sobre el módulo de elasticidad estático y dinámico del concreto, realizando ensayos comparativos entre concreto con agregado redondeado, triturado y volcánico.

Landaverde (2011), estudia la calidad de los agregados en cuatro canteras y cuatro bancos de explotación más importantes del El salvador, utilizados para concreto hidráulico. Realiza pruebas de laboratorio a cada pedrera y arenera, el estudio comprendió un muestreo quincenal a partir de julio de 1997, finalizando en el mes de junio de 1998. Analiza la calidad de las mismas sobre la base del cumplimiento o no de las normas ASTM, aplicando la estadística para determinar el comportamiento de los resultados en el tiempo, aporta conclusiones y recomendaciones para cada fuente de explotación.

3. MARCO TEORICO

El concreto se obtiene de la mezcla de la pasta (cemento-agua) y agregados pétreos, los cuales no son menos importantes que la pasta de cemento endurecido, el agua libre, el aire naturalmente atrapado o los aditivos. Por el contrario, las características del concreto en estado endurecido como en estado plástico están en función de las características de los agregados.

Según varias fuentes los agregados pétreos se definen como:

El Instituto colombiano del Concreto (1997), expone que los agregados son el mayor constituyente del concreto, generalmente componen más del 70 por ciento del material en un metro cúbico de concreto y son los que hacen que éste sea un material económico de construcción. Son cualquier sustancia sólida o partículas añadidas intencionalmente al concreto que ocupan un espacio rodeado por pasta de cemento, de tal forma que en combinación con ésta proporcionan resistencia mecánica al mortero o concreto en estado endurecido y controlan los cambios volumétricos que normalmente tienen lugar durante el fraguado del cemento así como los que se producen por las variaciones en el contenido de humedad de las estructuras.

Asogravas (2012), se refiere a cualquier combinación de arena, grava o roca triturada en su estado natural o procesado. Son minerales comunes, resultado de las fuerzas geológicas erosivas del agua y del viento. Son generalmente encontrados en ríos y valles, donde han sido depositados por las corrientes de agua. Los agregados son productos minerales imprescindibles para la sociedad, en general son materiales de bajo costo, abundantes en la naturaleza, por lo que

deben estar situados cerca a los centros de consumo, teniendo en cuenta su alta sensibilidad a los costos de transporte.

Los agregados pueden clasificarse de acuerdo a su tamaño, su densidad, su forma y origen.

3.1 CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO

Según Neville (1999), de acuerdo al volumen de sus partículas se dividen en:

- *Agregado fino (Arena)*: es el material que pasa en un 95 por ciento de sus partículas por el tamiz No. 4 (tamiz según norma Estadounidense), de 4.76 mm (3/16") de abertura entre hilos.
- *Agregado grueso (Grava)*: es el material que queda retenido en el tamiz de 150 mm (6"), cuyas partículas son en un 95 por ciento mayores de 4.76 mm.

Una clasificación más específica es la que se muestra en la Tabla 1, donde se indican los nombres más usuales de las fracciones y su aptitud como agregados para concreto según su tamaño.

Tabla 1. Clasificación general del agregado según su tamaño.

Tamaño de las partículas en mm. (Pulgadas)	Denominación más corriente	Clasificación	Clasificación como agregado para concreto
Inferior a 0,002 Entre 0,002 - 0,074 (No 200)	Arcilla Limo	Fracción muy fina	No recomendable
Entre 0,074 - 4,76 (No 200) - (No 4)	Arena	Agregado fino	Material apto para producir concreto
Entre 4,76 - 19,1 (No 4) - (3/4")	Gravilla	Agregado grueso	

Tamaño de las partículas en mm. (Pulgadas)	Denominación más corriente	Clasificación	Clasificación como agregado para concreto
Entre 19,1 – 50,8 (3/4" – 2")	Grava		
Entre 50,8 – 152,4 (92") – (6")	Piedra	Agregado grueso	Material apto para producir concreto
Superior a 152,4 (6")	Rajón, piedra bola		

Fuente: Tecnología del concreto.

3.2 CLASIFICACIÓN POR SU ORIGEN

Según Instituto Colombiano del Concreto (1997), pueden ser naturales y artificiales.

- *Naturales:* Son todos aquellos que provienen de la explotación de fuentes naturales tales como depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río) o de glaciares (Cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales.
- *Artificiales:* Estos agregados se obtienen a partir de productos y procesos industriales tales como arcillas expandidas, escorias de alto horno, clinker, limaduras de hierro y otros. Por lo general estos agregados son más ligeros o pesados que los ordinarios.

3.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU FORMA

Según Instituto Colombiano del Concreto (1997), la forma de los agregados afecta la manejabilidad del concreto, esta forma depende del tipo de roca que lo originó.

Las formas perjudiciales son las más alargadas y/o escamosas ya que influyen en el cemento, la resistencia y la durabilidad, ver tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de las partículas según su forma

Clasificación	Descripción
Redondeada (Frotamiento)	Totalmente desgastada por el agua o completamente limitada por ella
Irregular	Irregular natural o parcialmente limitada por frotamiento y con caras redondeadas
Angular	Posee caras bien definidas, que se forman en la intersección de caras más o menos planas
Escamosa	Material en el cual el espesor es pequeño en (laminar) relación con las otras dos dimensiones
Elongada	Material normalmente angular, en el cual la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones
Escamosa y elongada	Material cuya longitud es considerablemente mayor que el ancho y este es considerablemente mayor que el espesor

Fuente: Instituto del concreto (1997).

La textura del agregado está asociada con la forma. Generalmente, los agregados redondeados tienen una textura lisa y los agregados angulares tienen una textura rugosa, pero incluso cuando la superficie del agregado redondeado es lisa, es suficientemente rugosa para desarrollar un vínculo razonable bueno entre la superficie y el gel sub-microscópico del cemento, Shetty (2005). La clasificación más usada se encuentra en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de la textura superficial de los agregados.

Grupo	Textura superficial	Características
1	Vítrea	Fractura concoide
2	Lisa	Desgastada por el agua o losa debido a la fractura de la roca laminada o de grano fino.
3	Granular	Fractura que muestra granos más o menos uniformemente redondeados.
4	Áspera	Fractura áspera de rocas con granos finos o medianos que contienen partículas cristalinas no fácilmente visibles.
5	Cristalina	Contiene partículas fácilmente visibles
6	Apanalada	Con poros y cavidades visibles

Fuente: Instituto del concreto, 1997.

3.4 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU DENSIDAD

Los agregados pueden constituirse en ligeros, normales o pesados de acuerdo a su densidad. La cual depende de la cantidad de masa por unidad de volumen y el volumen de los poros, como lo indica la Tabla 4. Estas diferencias los hacen aptos para producir concreto con cierta variedad en el peso unitario, lo cual es una característica básica del material (Alatorre y Uribe 1998).

Tabla 4. Clasificación del agregado según su densidad.

Tipo de concreto	Peso unitario aprox. del concreto Kg./m ³	Peso unitario del agregado Kg./m ³	Ejemplo de utilización	Ejemplo de agregado
Ligero	400-800	60-480	Concreto para aislamientos	Piedra pómez Perlita
	950-1350	480-1040	Concreto para rellenos y mampostería no estructural	
	1450-2000		Concreto estructural	
Normal	2000-2500	1300-1600	Concreto estructural y no estructural	Canto rodado, agregados de ríos o triturado
Pesado	2.500-6000	3400-7500	Concreto para protección contra radiación gamma o X y contrapesas	Piedra barita y magnetita

Fuente: Tecnología del concreto.

Las características del agregado que influyen en un concreto de buena calidad incluyen la porosidad, la granulometría o distribución de tamaños, la absorción de humedad, la forma y la textura de la superficie, la resistencia a la ruptura, el módulo de elasticidad y los tipos de sustancias nocivas presentes.

Estas características se derivan de la composición mineralógica de la roca original, las condiciones de exposición o meteorización a que la roca ha estado sujeta antes de formar el agregado. Una revisión de los aspectos de formación de la roca, su clasificación y minerales que las forman, es esencial para entender su composición y su influencia en el concreto.

Las rocas se clasifican de acuerdo con su origen en tres grupos principales: ígneas, sedimentarias y metamórficas; estos grupos se subdividen a su vez de acuerdo con su composición mineralógica, química, textura o tamaño de granos, entre otras.

3.5 ROCAS ÍGNEAS

Las rocas ígneas se forman al enfriarse el magma (materia de roca fundida) sobre la superficie o interior de la tierra. El grado de cristalinidad y el tamaño del grano varían según la rapidez a la cual fue enfriado el magma al momento de la formación de la roca. De acuerdo con la velocidad de enfriamiento del magma, se obtiene una textura dada, la cual tienen gran incidencia en la capacidad de adherencia del material. Dependiendo del porcentaje de sílice que contienen se clasifican en: ácidas, intermedias y básicas. Según el lugar de formación se clasifican en: intrusivas y extrusivas o volcánicas.

La mayoría de las rocas son duras, fuertes, densas y resistentes a los agentes meteorizantes, sin embargo pueden estar muy fracturadas y aun así son muy buenas como materiales de construcción. Son los agregados del concreto más químicamente activos y muestran una tendencia a reaccionar con los álcalis en el cemento debido a la estructura cristalina y alto contenido de sílice presente. Cuando han sufrido un proceso erosivo y se encuentran en aluviones a lo largo de los lechos de los ríos y en las terrazas, pueden perder muchas de sus propiedades, de tal manera que ya no sean útiles para ciertos fines (Shetty 2005).

A continuación se presenta la descripción de los tipos de rocas ígneas más comunes, los principales minerales y características de las mismas como agregados pétreos ver tabla 5.

Tabla 5. Composición de las rocas ígneas y características como agregados pétreos.

TIPO DE ROCA	NOMBRE COMUN	PRINCIPALES MINERALES PRESENTES	CARACTERISTICAS DEL AGREGADO
Intrusiva y plutónica	Granito	Cuarzo, Feldespato, plagioclasa, ortoclasa, mica.	<p>Las rocas de este grupo generalmente hacen agregados excelentes debido a que:</p> <p>1). Tienen granos de medio a grueso, son resistentes y producen fragmentos equidimensionales al triturarse.</p> <p>2). Tienen muy baja porosidad y absorción de humedad.</p> <p>3). No reaccionan con los álcalis en el concreto de Cemento Portland.</p>
	Sienita	Feldespato, Plagioclasa, ortoclasa, Hornblenda, biotita.	
	Diorita	Feldespato, Plagioclasa, Hornblenda, biotita.	
	Gabro	Hornblenda, augita, feldespato, plagioclasa.	
	Diabasa o Dolerita	Los mismos minerales del Gabro pero de grano medio a fino.	
Intrusiva superficial hipoabisal	Grupo de la felsita, riolita, traquita, andesita	La composición mineral de las rocas del grupo felsita, riolita, traquita y andesita, es equivalente del granito, sienita y diorita respectivamente.	<p>Las rocas de este grupo tienen grano fino y duro y hacen un buen agregado excepto que las felsitas, cuando son microcristalinas o contiene vidrio natural, son reactivadas con los álcalis del concreto de cemento Portland, Sin embargo en el caso del basalto, aun cuando contiene vidrio natural, éste es generalmente básico y por lo tanto no reacciona con los</p>
	Basalto	Esta roca es el equivalente extrusivo del Gabro y la Diabasa.	

TIPO DE ROCA	NOMBRE COMUN	PRINCIPALES MINERALES PRESENTES	CARACTERISTICAS DEL AGREGADO
			álcalis del concreto.
Extrusiva o volcánica	Obsidiana	Vidrio denso, oscuro, natural con alto contenido de sílice	Son densos y duros pero no se encuentran comúnmente.
	Vidrio volcánico	Vidrio natural contiene hasta el 10% de agua.	
	Perlita	Vidrio con alto contenido de sílice con textura de cebolla y lustre perlado, contiene del 2 al 5% de agua.	Es usada generalmente para hacer concretos aislantes.
	Pómez	Vidrio poroso con huecos alargados	La pómez, la escoria y las tobas son porosas y débiles, útiles para producir concreto de peso ligero y aislante.
	Escoria	Vidrio poroso con huecos esféricos.	
Toba	Vidrio poroso formado por la consolidación de la ceniza volcánica.		

Fuente: Ortiz 2006.

3.6 ROCAS SEDIMENTARIAS

Las rocas sedimentarias se forman en la superficie de la tierra por procesos de erosión y alteración de rocas pre-existentes, lo que supone su disgregación, la formación de detritus, la disolución de componentes en soluciones acuosas, el transporte de los mismos y el depósito de fragmentos de rocas, de organismos o material de precipitación química en zonas apropiadas (cauces de ríos, lagos, mares, etc.). Incluye transformaciones originadas en el ambiente de depósito una

vez enterradas por debajo de la superficie atmosférica o acuosa (transformaciones diagenéticas). Por esta razón, suelen presentar una disposición en capas denominada estratificación.

Los agregados producidos con sedimentos estratificados pueden variar ampliamente en sus propiedades, como son su forma, textura, porosidad, resistencia y pureza, debido a las condiciones bajo las cuales fueron consolidadas. Las rocas tienden a ser porosas y débiles cuando se forman bajo presiones relativamente bajas. Son densas y resistentes si se forman bajo alta presión. Dichas rocas pueden variar de blandas a duras, de porosas a densas y de ligeras a pesadas. El grado de consolidación, el tipo de cementación, el espesor de las capas y la contaminación, son factores decisivos para determinar la conveniencia como agregados para concreto (Shetty, 2005).

Algunas rocas calizas y areniscas pueden tener menos de 100 MPa de resistencia a la trituración, siendo inadecuadas para su uso en concreto de alta resistencia. Si se compara con las rocas ígneas, las rocas sedimentarias contienen impurezas que en ocasiones no permite su uso como agregado (Instituto Colombia del Concreto 1997).

A continuación se presenta la descripción de los tipos de rocas ígneas más comunes, los principales minerales y características de las mismas como agregados pétreos (Tabla 6).

Tabla 6. Composición de las rocas sedimentarias y características como agregados pétreos.

TIPO DE ROCA	NOMBRE COMUN	PRINCIPALES MINERALES PRESENTES	CARACTERISTICAS DEL AGREGADO
Clástica	Conglomerado	Fragmentos de roca y matriz	
	Arenisca	Cuarzo, feldespato, plagioclasa	Puede contener cementante sílico que es reactivo con los álcalis del cemento.
	Lutita	Minerales arcillosos	Puede presentar fisibilidad, baja resistencia a la compresión, puede hidratarse a través de los minerales arcillosos
No Clástica	Caliza	Calcita	Altamente soluble
	Marga	Calcita y minerales arcillosos	Minerales arcillosos pueden hidratar fácilmente
	Dolomita	Calcita y dolomita	Sus componentes mineralógicos pueden provocar la reacción álcali-carbonato
	Yeso	Yeso anhidrita	Muy ligero, baja la resistencia a la abrasión.
	Carbón	Carbón	Ligero, deleznable y/o frágil, produce problemas durante la hidratación del cemento portland

Fuente: Chan et al. 2003

3.7 ROCAS METAMÓRFICAS

Las rocas metamórficas son rocas ígneas o sedimentarias que han cambiado su textura original, su estructura cristalina o su composición, como respuesta a condiciones de grandes presiones que sufren los estados profundos, temperaturas elevadas que hay en el interior y emanaciones de los gases del magma. La clasificación de las rocas metamórficas se basa según sus propiedades fisicoquímicas composición mineral y textural. Las rocas más comunes son el mármol, cuarcita, esquisto, filita, pizarra y gneis.

Para usar estas rocas como agregados pétreos se debe hacer una revisión en la textura, pues son densas pero frecuentemente foliadas y con alto índice de alargamiento y partículas deléznables (Shetty 2005).

A continuación se presenta la descripción de los tipos de rocas metamórficas más comunes, los principales minerales y características de las mismas como agregados pétreos ver tabla 7.

Tabla 7. Composición de las rocas Metamórficas y características como agregados pétreos.

TIPO DE ROCA	NOMBRE COMUN	PRINCIPALES MINERALES PRESENTES	CARACTERISTICAS DEL AGREGADO
Foliadas	Pizarra	Cuarzo, micas, clorita, sericita	deleznable
	Esquisto	Micas, clorita, cuarzo feldespato	A veces muy deleznable
	Gneis	Cuarzo, feldespato, ferromagnesianos	Fabricación de hormigones, aglomerado asfáltico y

TIPO DE ROCA	NOMBRE COMUN	PRINCIPALES MINERALES PRESENTES	CARACTERISTICAS DEL AGREGADO
			subcapas de carreteras.
No Foliadas	Hornfels o corneana	Mica, granate, piroxeno, cuarzo, feldespato.	Puede presentar sílice del tipo reactivo con los álcalis del cemento. Las características mecánicas dependen de la litología de los materiales afectados por la intrusión y los propios del cuerpo intrusivo
	Cuarcita	Cuarzo, feldespato, sillimanita formadas por recristalización de areniscas	masivas, duras y de colores variados,
	Mármol	Calcita, piroxeno	Masiva

Fuente: Chan et al. 2003

3.8 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

Los agregados pétreos, necesitan de una inspección de calidad rigurosa para obtener con ello la realización de concretos con propiedades de estándares elevados, es importante y necesario efectuar los ensayos respectivos, que logren determinar las características físicas, mecánicas, mineralógicas y químicas de los mismos. Las especificaciones de las Normas Icontec o de las normas de la Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales ASTM (por sus siglas en inglés) establece los parámetros necesarios, que deben cumplir los agregados para ser considerados apropiados para su utilización en mezclas de concreto. Por

lo que a continuación se menciona cada uno de los ensayos y sus respectivas normas.

3.8.1. Propiedades Mineralógicas y Petrográficas del Agregado

El carácter mineralógico de los agregados está dado por las características mineralógicas de la roca madre de donde provengan y pueden ayudar a conocer mejor la calidad del material en una situación determinada, en este caso la norma ASTM C-294 describe los minerales más comunes de los agregados. Las técnicas para ejecutar el análisis petrográfico se encuentran descritas en la norma ASTM C-295.

3.8.1.1. Descripción de los minerales. A continuación se presenta una breve descripción de los minerales constitutivos que comúnmente aparecen en las rocas naturales, descritos en la Norma ASTM C-294.

- **Minerales de sílice:** El cuarzo es un mineral duro muy común, compuesto de Si O₂ cristalino. La dureza del cuarzo así como la del feldespato se deben al marco de la estructura Si-O₄, que es muy resistente. El cuarzo se encuentra en rocas ígneas de tipo ácido > 65 por ciento de Si O₂, tales como el granito y la riolita. Debido a su resistencia al intemperismo es un constituyente importante de muchos depósitos de arena de grava y de areniscas, la tridimita y la cristobalita también son materiales de sílice cristalinos, pero son metaestables a temperatura y presiones ordinarias y se les encuentra raramente en la naturaleza con excepción de las rocas volcánicas. Los minerales no cristalinos son denominados como vidrio.
- **Minerales de silicatos:** Los feldespáticos, los ferromagnesianos los micáceos y los minerales de arcilla corresponden a esta categoría. A continuación se describen cada uno de los minerales que forman este grupo:

- **Minerales Feldespáticos:** Los minerales del grupo del feldespato son minerales más abundantes que forman las rocas en la corteza terrestre y son importantes componentes de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Casi tan duro como el cuarzo, los distintos elementos del grupo se diferencian por su composición química y sus propiedades cristalográficas. La ortoclasa, la sanidina y la microclina son silicatos de aluminio y de potasio, que son frecuentemente llamados feldespatos de potasio. La plagioclasas o feldespatos de cal-sosa incluyen silicatos de aluminio y de sodio (albita), silicatos de aluminio y de calcio (anortita), o ambos. Los feldespatos alcalinos que contienen potasio o sodio aparecen generalmente en rocas ígneas de alto contenido de sílice, tales como los granitos y las riolitas, mientras que las que tienen más alto contenido de calcio, se encuentran en las rocas ígneas de bajo contenido de sílice, tales como la diorita, el gabro y el basalto.
- **Minerales ferromagnesianos:** Aparecen en muchas rocas ígneas y metamórficas, consisten en silicatos de hierro o de magnesio, o en ambos. Los minerales con contenido de estructura cristalina de anfibolita y de piroxeno son conocidos como hornblenda y augita respectivamente. El olivino es un mineral común de esta clase, que se encuentra en las rocas ígneas de contenido relativamente bajo de sílice.
- **Minerales micáceos:** La moscovita, la biotita, la clorita y la vermiculita, que forman el grupo de minerales micáceos, también contienen silicatos de aluminio, hierro y de magnesio, pero su composición estructural laminar interna es responsable de la tendencia a separarse en hojas finas. Las micas son abundantes y aparecen en los tres grupos principales de rocas.
- **Minerales de arcilla:** Comprende los minerales con estructura laminar menor de 2 μm (0.002 mm) de tamaño. Los minerales de arcilla, que

consisten principalmente en aluminio hidratado, magnesio y silicatos de hierro, son los principales componentes de las lutitas y las arcillas. Son suaves y se desintegran al mojarse; algunas arcillas (conocidas como montmorillonitas en Estados Unidos y como esméctitas en el Reino Unido), sufren grandes expansiones al mojarse.

Las arcillas y las pizarras no son por lo tanto directamente utilizadas como agregados del concreto. Sin embargo, los minerales arcillosos pueden estar presentes como contaminantes en una agregado mineral natural.

- **Minerales de carbonato:** El mineral de carbonato más común es la calcita o el carbonato de calcio, CaCO_3 . El otro mineral más común es la dolomita, que tiene proporciones equimoleculares de carbonato de calcio y carbonato de magnesio (que corresponde a 54.27 y 45.73 por ciento en peso de CaCO_3 y MgCO_3 respectivamente). Ambos minerales de carbonato son más blandos que el cuarzo y que el feldespatos.
- **Minerales de sulfato y sulfuro:** Los sulfuros de hierro como la pirita, la marcasita y la pirrotita, se hallan frecuentemente en agregados naturales. La marcasita, que se encuentra principalmente en las rocas sedimentarias, se oxida rápidamente para formar ácido sulfúrico e hidróxidos de hierro. La formación de ácidos es indeseable, especialmente desde el punto de vista de la corrosión potencial del acero en concretos pre-forzados y reforzados. La marcasita y ciertas formas de pirita y pirrotita se piensa que pueden ser las responsables de los cambios expansivos de volumen en el concreto, causándole grietas y botaduras. El yeso (sulfato de calcio hidratado) y la anhidrita (sulfato de calcio anhidro) son los minerales de sulfatos más abundantes que pueden estar presentes como impurezas en las rocas de carbonato y en las pizarras. Algunas veces se encuentran como recubrimientos en arena y en grava; tanto el yeso como la anhidrita, cuando se

hallan presentes en el agregado incrementan las posibilidades de un ataque de sulfatos en el concreto.

3.8.1.2. Examen petrográfico. Esta práctica perfila el examen petrográfico de muestra representativa de materiales propuestos para agregados a utilizar en concreto. Los procedimientos específicos empleados en el examen petrográfico de cualquier muestra, según Norma ASTM C-295. En la mayoría de los casos el examen requiere del uso de microscopio óptico. También puede llegar a utilizarse procedimientos adicionales como análisis de difracción de rayos X, análisis térmico diferencial, espectroscopia infrarroja y otros.

El examen petrográfico se realiza para los siguientes casos:

- Para determinar las características físicas y químicas del material, que puede ser observado por un examen petrográfico a un material que se dará uso internacional.
- Para determinar las cantidades relativas de los componentes que pueden o no ser apropiadas para la muestra en estudio.
- Descripción y clasificación de los componentes de la muestra.
- Comparar muestra de agregados de nuevas fuentes con una o más fuentes conocidas para tener registro de los rendimientos de los materiales.

3.8.1.3 Importancia y uso. El examen petrográfico proporciona una identificación de los tipos y variedades de rocas presentes en los agregados potenciales. También se identifica los minerales presentes en la muestra. El examen petrográfico de agregados puede enfocarse específicamente a evaluar la posible presencia de material contaminante en los agregados, como vidrio sintético, carbonillas, escorias o la ceniza del carbón, óxido de magnesio, óxido de calcio, o ambos; la suciedad, hidrocarburos, químicos que pueden afectar la conducta del concreto o las propiedades del agregado, excremento animal, plantas o

vegetación podrida y la reacción álcali-agregado, que se origina entre determinados agregados activos y los óxidos de sodio y potasio del cemento.

La reacción se inicia en la superficie del agregado y se produce en la interfase con la pasta de cementos formando un gel que toma agua y se dilata creando presiones internas que llevan a la rotura del material y comprende los siguientes sistemas, reacción álcali-sílice, reacción álcali-silicato y la reacción álcali-carbonato. Para nuestro estudio de rocas se ha enfocado la determinación de minerales que presentan posiblemente reacción álcali-sílice. En la tabla 8 se da referencia a las sustancias reactivas de acuerdo con la experiencia americana, conforme las recogen las normas ACI (American Concrete Instituto).

Tabla 8. Minerales Reactivos

Sustancia Reactivas	Composición Química	Características físicas
Ópalo	SiO ₂ nH ₂ O	Amorfos
Calcedonia	SiO ₂	Microcristalino a criptocristalino; comúnmente fibroso
Formas de cuarzo	SiO ₂	(a) Microcristalino a (b) Criptocristalino, pero intensamente fracturado. Y/o inclusión relleno
Cristobalita	SiO ₂	Cristalino
Riolítico, dacítico, latítico, o andesítico, vítreo o criptocristalino, diversificación de productos	Silíceos con menos proporciones de Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₂ , tierra alcalina y álcalis	Vítreo o materiales criptocristalino como matriz de rocas volcánicas o fragmentos en las tufas
Silicios sintéticos vítreos	Silíceos con menor proporción de álcalis,	Vítreos

Fuente: Norma ACI (American Concrete Instituto).

3.8.1.4 Toma de muestra. La toma de muestra para el examen petrográfico debe realizarse bajo la supervisión de personal que se encuentre familiarizado con los requisitos necesarios para la toma de muestra de agregados para concretos como son la localización donde fue tomada la muestra, la geología del sitio y debe recolectarse otros datos pertinentes con la muestra. La cantidad del material realmente estudiada en el examen petrográfico se encuentra en función de la naturaleza del examen y la calidad del material a evaluar en la muestra.

3.8.2 Propiedades Físicas del Agregado.

Para determinar las propiedades físicas del agregado la norma ASTM C-33 de la cual se ha extractado la Norma Icontec 174, especifica los procedimientos y las características que deben cumplir los agregados para su uso. La norma recomienda realizar ensayos de:

- Granulometría
- Determinación de Materia Orgánica
- Resistencia a los Ataques de Sulfato de Sodio o Magnesio
- Contenido de Humedad
- Porcentaje de Absorción
- Gravedad Específica
- Peso Unitario

3.8.2.1. Granulometría, Norma Icontec 77 (ASTM C-33). La granulometría está definida como la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados. Se determina mediante el análisis granulométrico que consiste en dividir una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. La operación de separar una masa de agregado en fracciones de igual tamaño, consiste en hacer pasar este a través de una serie de tamices que tienen aberturas cuadradas y los resultados de este análisis se expresan de forma tabulada, como se ve en la tabla 9.

Tabla 9. Determinación de la granulometría de agregados para concreto

Tamiz pulgadas. (1)	mm	Peso retenido gramo. (2)	% retenido (3)	% retenido acumulado. (4)	% pasa. (5)
38.1	-1 1/2	X1	Y1	Z1	t1
25.4	- 1	X2	Y2	Z2	t2
19.1	- 3/4	X3	Y3	Z3	t3
12.7	- 1/2	X4	Y4	Z4	t4
9.51	-	X5	Y5	Z5	t5
4.76		X6	Y6	Z6	t6
Fondo		X7	Y7	100%	t7
Total		X _t	100%		

Fuente: Tecnología del concreto

Columna (1): Se indica la serie de tamices deseada, en orden descendente, orden descendente. (En la tabla se indican algunos a manera de ejemplo)

Columna (2): Aparece indicado el peso retenido en cada tamiz X_i

Columna (3): Cada valor X_i de la columna (2) se expresa como porcentaje del peso total de la muestra X_t de acuerdo con la siguiente expresión: $Y_i = (X_i/X_t) * 100$

Columna (4): Va indicando el acumulado de los porcentajes retenidos en cada tamiz de acuerdo con la siguiente expresión: $Z_i = \sum Y_i$

De tal manera que, por ejemplo $Z_i = Y_1$, $Z_2 = Y_1 + Y_2$, $Z_3 = Y_1 + Y_2 + Y_3$, y así sucesivamente hasta llegar a $Z_n = 100\%$

Columna (5): con base en el porcentaje retenido acumulado que pasa también por cada tamiz. Como el porcentaje retenido acumulado es el complemento para llegar al 100% del porcentaje que pasa, este último fácilmente se determina según la siguiente expresión:

$$T_i = 100 - Z_i$$

Los resultados del análisis granulométrico se representan de manera grafica mediante la curva granulométrica o línea de cribado. La Norma Icontec 77 (ASTM 33) especifica que para:

- *Agregados finos*

Es el material que pasa el tamiz No 4, hasta el tamiz No 100 y consiste de agregado de canto rodado o de río, arena de origen natural; roca triturada o la combinación de todas. La granulometría recomendable para agregados finos se encuentra descrita en la tabla 10, así también el grado de finura en la tabla 11.

Tabla 10. Limites de granulometría para el agregado fino

Tamiz	Porcentaje que pasa
3/8 (9.51 mm)	100
No 4 (4.76 mm)	95 a 100
No 8 (2.38 mm)	80 a 100
No 16 (1.19 mm)	50 a 85
No 30 (600 um)	25 a 60
No 50 (300 um)	10 a 30
No 100 (150 um)	2 a 10

Fuente: Tomado de la norma ASTM C-33

Tabla 11. Clasificación de la arena por su modulo de finura

Tipo de arena	Modulo de finura
Gruesa	2.90-3.20 gramos
Media	2.20-2.90 gramos
Fina	1.50-2.20 gramos
Muy fina	1.5 gramos

Fuente: Gaitán Orozco, Análisis mineralógico y examen petrográfico de agregado fino para concreto de tres bancos de la región central del país Página 25.

- *Agregado grueso*

Suele considerarse como agregado grueso el formado por partículas retenidas a partir del tamiz No 4. Para su buena utilización, estos no deben ser demasiado porosos, ni de forma muy alargada. Las formas angulosas o planas hacen más difícil el amasado y colocación del concreto, debido a la misma forma, además no existe la adherencia adecuada ni uniformidad apropiada. El agregado grueso será constituido fundamentalmente por grava; piedra triturada, escoria de explosión, o bien de la combinación de las anteriores; el agregado proveniente de roca triturada puede tener partículas susceptibles a elementos alcalinos, al ataque de sulfatos y materia orgánica.

La granulometría de los agregados gruesos deben conformar los requerimientos descritos en la norma, para el número de tamiz especificado. El tamaño del agregado se encuentra en función a las necesidades específicas para el diseño del concreto.

3.8.2.2. Contenido de Materia Orgánica, Norma Icontec 127 (ASTM C-40). La materia orgánica es una de las sustancias perjudiciales ya que afecta la hidratación y adherencia del cemento con los agregados, y si está presente en alto grado, puede bajar la resistencia del concreto. La norma contempla que este ensayo debe hacerse a agregados finos.

Los agregados finos sujetos al ensayo de impurezas orgánicas y que producen un color más oscuro que el estándar deben ser rechazados. El máximo permisible de acuerdo a la norma es el número 3. La utilización de un agregado fino que ha fracasado en el ensayo no está prohibida, siempre que la decoloración se deba principalmente a la presencia de pequeñas cantidades de carbón, lignito o partículas discretas similares, ver tabla 12.

Tabla 12. Límites de sustancias dañinas en agregados para hormigón.

	Porcentaje máximo de la masa total de la muestra	
	Agregado fino	Agregado grueso
Partículas deleznable (*)	1.0	0.25
Material que pasa el tamiz Icontec 74	3.0	1.0
Hormigón sujeto a desgaste	5.0	
MATERIA ORGANICA		
Ensayo colorimétrico, número máximo	3.0	

(*) Las que pueden romperse con los dedos

Fuente: Tomado de Norma Icontec -127

3.8.2.3. Determinación de Peso Unitario, Norma Icontec 92 – ASTM C29. El peso unitario aparente o peso volumétrico es la relación entre peso de un material y el volumen ocupado por el mismo, expresado en kg/m³. Hay dos valores para esta relación: el peso volumétrico suelto, y el peso volumétrico apisonado. El primero se usa para conversiones de peso a volumen, para conocer el consumo de agregados por metro cúbico de concreto. El segundo se usa para conocer el volumen de materiales apilados. Al determinar el peso unitario se observa que este está influenciado por la eliminación de vacíos, por lo que se calcula con el material seco apisonado y suelto.

3.8.2.4. Determinación de Peso Específico y absorción de agregados gruesos, Norma Icontec 176 – ASTM C127. La densidad o masa específica de un cuerpo homogéneo es la masa por unidad de volumen. Si en lugar de tomar la masa de un cuerpo se toma su peso, se tiene lo que se conoce como peso específico. El peso específico aparente relativo es la relación entre el peso de un volumen aparente de un cuerpo y el peso de otro volumen aparente de otro cuerpo tomado como comparación, a igual intensidad de la gravedad y en las mismas condiciones de temperatura y presión.

La gravedad específica corresponde al peso específico relativo y para agregados gruesos se determina por métodos descritos en la Norma Icontec 176 (ASTM C-127) que consiste en medir desplazamientos del agua, producida por un peso conocido de agregado en condición saturada y de superficie seca, se usa para este objeto una probeta calibrada. La absorción es la cantidad de agua capaz de ser tomada por un material después de 24 horas de inmersión y se expresa como un porcentaje del peso seco del material.

3.8.2.5 Determinación de Humedad, Norma Icontec 1776 (ASTM C-566). La humedad de un agregado está compuesta por humedad de saturación y humedad libre o superficial. Para corregir el peso del material al hacer mezclas de concreto,

es necesario obtener el porcentaje de humedad contenida además del porcentaje de absorción del agregado.

Un cambio de contenido de humedad del 1%, si no se compensa puede cambiar el asentamiento del concreto en 1.5 pulgadas y la resistencia en 300 lbs/pulg². Los agregados pueden encontrarse en cualquiera de los cuatro estados siguientes:

- Seco al horno, completamente seco y absorbente.
- Seco al aire, seco en su superficie pero conteniendo algún porcentaje de humedad, menor que la requerida para saturar las partículas. Algo absorbente.
- Húmedo o mojado, contiene exceso de humedad en la superficie de las partículas.
- Saturado y de superficie seca, que es la condición ideal que debe tener el agregado para que no adicione o absorba agua del concreto.

Para proporcionar mezclas de concreto, todos los cálculos deben basarse en agregado en condición seco-saturada. Debe tomarse una muestra representativa del material al evaluar por medio de cuarteo de la misma, considerando el peso necesario de acuerdo a la tabla 13.

Tabla 13. Cantidad de material en unidades de peso para realizar el cuarteo en el ensayo de contenido de humedad

Tamaño de Agregado	Peso de la Muestra
Menor de 4.76 mm	200 gramos
De 4.76 a 19.0 mm	500 gramos
De 19.0 a 38.1 mm	1000 gramos
Mayor a 38.1 mm	1000 gramos

Fuente: Tomado de la norma Icontec 1776

3.8.2.6. Determinación de la resistencia de los agregados a los ataques con sulfato de magnesio Norma Icontec 126 (ASTM C-88). Los sulfatos en solución producen un fuerte ataque que se manifiesta en deformaciones y fisuras. Los sulfatos se encuentran en la naturaleza en forma sólida (yeso, anhidrita, etringita) o disueltos en aguas superficiales y subterráneas, así como en los suelos. Sus concentraciones difieren considerablemente. El mecanismo de la reacción química de ion sulfato como sustancia agresiva consiste en la formación de una sal fuertemente expansiva, que produce fisuración y agrietamiento del concreto. Este ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por acción de los agentes climáticos durante la vida útil de la obra. Puede aplicarse tanto en agregado grueso como fino.

El ensayo se realiza exponiendo una muestra de agregado a ciclos alternativos de baño de inmersión en una solución de sulfato de sodio o magnesio y secado en horno. Una inmersión y un secado se consideran un ciclo de durabilidad. Durante la fase de secado, las sales precipitan en los vacíos del agregado. En la re-inmersión las sales se rehidratan y ejercen fuerzas de expansión internas que simulan las fuerzas de expansión del agua congelada. El resultado del ensayo es el porcentaje total de pérdida de peso sobre varios tamices para un número requerido de ciclos.

3.8.3. Propiedades Mecánicas del Agregado

Según Sánchez (1996) la falla de un concreto está regida por las resistencias del agregado, la pasta y de lo que se conoce como la interfase de adherencia. La resistencia del agregado cobra importancia cuando este falla antes que la pasta de cemento endurecida, esto es debido a que tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque se la ha inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación o por un inadecuado proceso de trituración.

En consecuencia a esto se ha desarrollado pruebas de resistencia a la trituración en muestra de rocas, el ensayo de abrasión en la máquina de los Ángeles Norma ASTM C-131 o Norma Icontec 98, permite conocer la resistencia al desgaste de los agregados.

El ensayo en la máquina de Los Ángeles es una medida de la degradación de los minerales de los agregados de graduaciones normales, resultando de una combinación de acciones incluyendo abrasión, impacto y molienda en un tambor rotativo de acero conteniendo un número específico de esferas, que dependerá de la graduación de la muestra. La máquina consiste en un cilindro hueco cerrado en ambos extremos, teniendo un diámetro interno de 28 pulgadas y largo interior de 20 pulgadas. Las cargas abrasivas consistirán en esferas de acero de una diámetro aproximado de 46.8 mm y cada una pesando entre 390 y 445 gramos.

Mientras el tambor rota, una placa eleva la muestra y las esferas de acero, transportándolas hasta ser soltadas desde la parte opuesta del tambor, crean un efecto de trituración por impacto. El contenido sigue rodando dentro del tambor con una acción de molienda abrasiva hasta que la placa hace impacto y el ciclo se repite. Después de transcurrido el número de revoluciones preestablecido, el contenido es removido del tambor y la porción de agregado es tamizada en la malla No 12 para medir el desgaste como el porcentaje de peso perdido.

3.8.3.1 Muestra de ensayo. La muestra de agregado debe estar secada al horno a una temperatura de 105 a 110 °C, hasta obtener un peso constante. La graduación, o graduaciones usadas serán aquellas que representen más adecuadamente el agregado suministrado como muestra. El tipo de desgaste que se le aplicara a la muestra, depende de la graduación de la misma. Para lo cual variará los tamices y el número de esferas a utilizar en el ensayo. Se requiere de 5 kg de la muestra para dicho ensayo. En la tabla 14 se clasifica el tipo de abrasión según su granulometría.

Tabla 14. Tipo de abrasión según granulometría

Tipo	Tamices	Peso retenido	No. de esferas	Revoluciones	Tiempo mínimo
A	1", ¾", ½" y ⅜"	1250±10	12	1000	15
B	1/2" y 3/8"	2500±10	11	1000	15
C	1/4" y No. 4	2500±10	8	1000	15
D	No. 8	5000	6	1000	15

Fuente: Tomado de la Norma Icontec 98

3.8.4. Propiedades Químicas de los Agregados

Una de las causas del deterioro del concreto, que ha sido objeto de más estudios en los últimos treinta años es la denominada reacción álcali-agregado, que se origina entre determinados agregados activos y los óxidos de sodio y potasio del cemento, (Stanton, 1945). La reacción se inicia en la superficie del agregado y se produce en la interfase con la pasta de cementos formando un gel que toma agua y se dilata creando presiones internas que llevan a la rotura del material. El fenómeno fue descubierto en los Estados Unidos en 1938. Los primeros estudios fueron realizados por Stanton, dos años después.

Según González (1991) la reacción álcali agregado comprende los siguientes sistemas:

3.8.4.1 Reacción Álcali-Carbonato: Este tipo de reacción se produce por los álcalis del cemento que actúan sobre ciertos agregados calcáreos, como por ejemplo, los calcáreos de grano fino que contienen arcilla, que son reactivos y expansivos. Este fenómeno se presenta cuando el concreto está sometido a atmósfera húmeda. La expansión se debe a la transformación de la dolomita en calcita y brucita, fuertemente expansiva, que tiene la forma de un gel que origina

una presión debido al crecimiento de los cristales. Se utiliza la norma ASTM 596-69 (1986) "Potencial álcali reactive of carbonate for concrete aggregates (rock cylinder method)" para determinar su reactividad.

3.8.4.2. Reacción Álcali-Silicato: Puede presentarse conjuntamente con la reacción álcali-sílice. Se caracteriza porque progresa más lentamente y forma gel en muy pequeña cantidad. Se estima que esta reacción se debe a la presencia de filosilicatos. En general, el conocimiento de este fenómeno es incipiente y más complejo y no se ha llegado a conclusiones sobre la expansión y el deterioro que ocasionan.

3.8.4.3 Reacción Álcali-Sílice (ASR): En la fabricación del hormigón, la hidratación del Pórtland da como resultado una solución intersticial que contiene hidróxidos de calcio, sodio y potasio. El hidróxido de calcio está en forma cristalizada mientras que los hidróxidos de sodio y potasio se encuentran presentes en la solución. La reacción álcali-sílice se produce cuando la disolución alcalina de los poros del hormigón y los minerales silíceos de algunos áridos reaccionan para formar un gel, que al embeber agua, aumenta de volumen. Para que se dé la reacción álcali-sílice, es necesaria la presencia de sílice reactiva, álcalis sodio y potasio, y agua. Pero para que la reacción además produzca fisuración y expansión se requiere que las cantidades tanto de sílice reactiva como de álcalis disponibles, sean significativas y que el agua provenga de una fuente externa. Como la expansión causada por la ASR se debe a las tensiones inducidas por el crecimiento del gel al absorber el fluido intersticial, ésta dependerá del volumen de concentración del gel, de su velocidad de crecimiento y de sus propiedades físicas. Si la velocidad de crecimiento es lenta, las fuerzas internas se disipan por la migración del gel a través del hormigón, mientras que si la velocidad es relativamente rápida, las fuerzas internas pueden llegar a un nivel en el que pueden ocasionar fisuras y la expansión del hormigón.

Gaskin et al. (1955) estudiaron la expansión producida en barras de mortero al utilizar formas distintas de sílice. Los ensayos se llevaron a cabo utilizando distintas proporciones de constituyentes reactivos con arenas de cuarzo inerte. Todas las barras de mortero tenían un contenido alcalino de cemento de 6'2 kg / m³ y fueron almacenadas a 20 °C. Los resultados que obtuvieron son los de la Tabla 15.

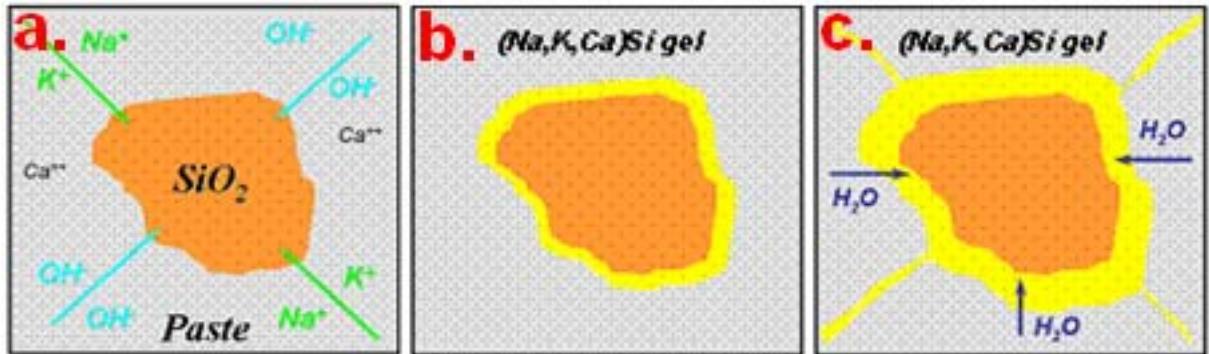
Tabla 15. Resultados obtenidos en por Gaskin et al.

A una edad de 6 meses, los siguientes constituyentes provocan expansiones en exceso de 0.05%:	
Ópalo	5, 10 y 20% en masa total de árido
Calcedonia	20%
Esquisto	(ópalo y calcedonia) 5 y 20%
Esquisto	(calcedonia y cuarzo criptocristalino) 10 y 20%
Pírex	10, 50 y 100%
A una edad de 4 ó 5 años, los siguientes “constituyentes reactivos” adicionales provocan unas expansiones en exceso del 0.05%:	
Cristobalita	10, 20 y 50%
Tridimita	10 y 20 %
Calcedonia	(cuarzo microcristalino y calcedonia) 5 %
Chert	(cuarzo criptocristalino) 20 %
Y los siguientes “constituyentes reactivos” provocaron expansiones de menos del 0'05%:	
Silicified Wood	(cuarzo microcristalino) 5, 10, 20 y 50%
Chert I	(cuarzo microcristalino) 20%
Chert 2	(cuarzo microcristalino) 100%
Arena de cuarzo	100%

Fuente: Gasnki 1955

Según la tabla se puede concluir que los minerales silíceos ensayados pueden ordenarse en base a su potencial reactividad como sigue: ópalo, calcedonia, cristobalita, tridimita, cuarzo criptocristalino.

Figura 1. Secuencia de la reacción álcali-sílice en el concreto.



Fuente: U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration

En la figura 1a la solución porosa del concreto está dominada por Na, K y OH con cantidades menores de Ca. Si la sílice en el agregado es reactiva con el OH, Na y K van a reaccionar con el SiO_2 .

En la figura 1b el producto de la reacción es un gel de sílice alcalino compuesto de Na, K, Ca y Si. El gel se forma en los alrededores y dentro del agregado.

En la figura 1c el gel se expande y con el tiempo las presiones pueden superar la resistencia a la tracción de la pasta y el agrietamiento del hormigón.

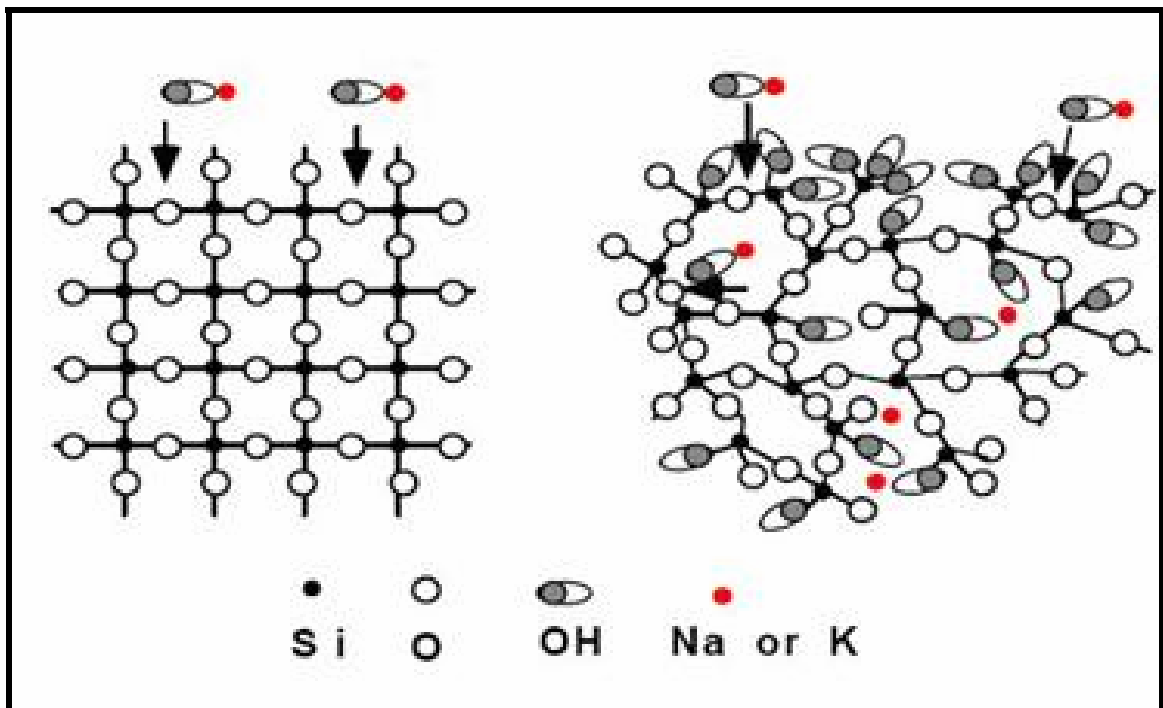
3.8.4.4 Factores que afectan a la reacción: Según Segarra (2011) entre los factores que influyen en la reacción álcali-sílice destacan los siguientes:

1. Propiedades de los Áridos

- **Composición** Los áridos que se ven afectados por la ASR, son aquellos que en su composición cuentan con minerales silíceos. Los áridos que componen los hormigones vienen de unas rocas que se encuentran en un estado distinto a sus condiciones naturales, por lo que evolucionarán hasta encontrar un nuevo equilibrio. Hay que tener en cuenta que a la hora de producirse la reacción, ésta

será más rápida en tanto que más desordenada sea la estructura del mineral: si la forma de sílice está bien cristalizada o es relativamente densa, el ataque será superficial, mientras que si está pobremente cristalizada los iones hidroxilos y sodio o potasio entrarán en el interior, esto se puede apreciar en figura 2 de Dent Glasser et al.(1980), en el caso (A) los iones no pueden penetrar y el ataque se reduce a la superficie, lo contrario sucede en el caso (B).

Figura 2. Reacción entre los iones hidroxilos y sodio o potasio y la estructura cristalina del mineral.



Fuente: Dent Glasser et al., 1978

En cuanto a los minerales se debe tener en cuenta que el cuarzo es la forma más común de sílice y tiene una disposición ordenada del tetraedro de silicio y oxígeno que es estable bajo condiciones normales. Por otro lado, el ópalo es la forma más desordenada y reactiva de sílice, forma una retícula aleatoria de tetraedros con espacios entre los grupos de moléculas.

- **Granulometría.** La reacción álcali-sílice puede producirse al utilizar arena o bien grava procedente de un árido reactivo. Hay muchos casos en que la expansión y fisuración del hormigón se produce en presencia de áridos reactivos con un tamaño comprendido en el rango de 1 a 5 mm (Es decir, las partículas más gruesas de árido fino), aunque en algunos casos la reacción ha ocurrido en el árido grueso, (Metha, 1986). Esto se debe a que la cantidad de sílice que reacciona depende de la superficie específica del árido de modo que cuanto mayor sea la relación superficie / volumen, más cantidad estará disponible.

En el caso de la fracción arena, experimentalmente se ha comprobado que la expansión del hormigón es mayor cuanto menor es el tamaño de la partícula, hasta llegar al tamaño de 75 mm (Metha, 1986).

Por otro lado, en cuanto a la gradación de los áridos, cuando un árido fino reactivo se combina con un árido grueso inocuo, la porosidad del árido grueso afecta a la reactividad global, pues cuanto mayor es su porosidad, menor es el daño que produce, (Alaejos y Bermúdez, 2003). Esto es debido a que los poros actúan como cámara de expansión, de modo que los productos de la reacción, al aumentar de volumen, ocupan en primer lugar estos poros sin provocar tensiones adicionales. Cuando se trata de árido grueso reactivo, la expansión es menor a una edad temprana, pero irá aumentando continuamente a lo largo del tiempo debido a que la superficie específica es menor que en un árido fino.

2. **Propiedades del cemento**

- **álcalis.** Los álcalis sodio y potasio en el cemento tienen su origen en las materias primas usadas para la manufactura del cemento Pórtland, arcillas, rocas calizas, tizas, y esquistos y si el carbón se usa como combustible, también pueden venir de las cenizas de éste. Los compuestos alcalinos en el clinker son sulfatos alcalinos, álcali – aluminatos y aluminio ferritas, y álcali - silicatos.

El contenido de ácido soluble de un cemento Pórtland se calcula convencionalmente como equivalente en óxido de sodio usando la fórmula siguiente:

$$(Na_2 O) e = Na_2O + 0,658 (K_2O)$$

Equivalente de óxido de sodio = contenido en óxido de sodio + 0,658 contenido en óxido de potasio.

3. Humedad ambiental

Para que se produzca la reacción álcali-sílice se necesita un cierto contenido de agua. Se considera que no se producirá daño, o que su evolución cesará, si la humedad ambiental es inferior al 80 %, suponiendo el aire como la única fuente de humedad.

Hay que tener en cuenta, que determinadas estructuras de hormigón, como las presas, están en contacto permanente con agua. Éstas, tienen por un lado, contacto permanente con la misma en el paramento aguas arriba y por otro, en su interior, dado que el hormigón tiene un cierto grado de permeabilidad, también habrá cierto grado de humedad.

4. Temperatura

En general, la velocidad de reacción y la formación de gel aumentan con la temperatura. Pero hay que tener en cuenta que al mismo tiempo, el gel a altas temperaturas mayores a 40°C es menos viscoso y se introduce mejor por las fisuras y huecos del hormigón, pudiendo disiparse en parte la expansión.

3.8.5 Elaboración de Concreto para Determinar Resistencias a la Compresión.

Para lograr las mejores propiedades mecánicas, el concreto debe contar con un esqueleto pétreo empacado lo más densamente posible, y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos que éste deje (Chan et al., 2003).

La principal medida de la calidad estructural del concreto es su resistencia a la compresión. Los ensayos para medir esta propiedad se realizan sobre especímenes cilíndricos de altura igual a dos veces el diámetro. Los moldes impermeables de esta configuración se llenan con concreto durante la operación de colocación. Los cilindros se curan generalmente por 28 días y posteriormente se ensayan en el laboratorio a una tasa de carga especificada. La resistencia a la compresión obtenida de tal ensayo se conoce como resistencia del cilindro f'_c y es la principal propiedad especificada para propósitos de diseño y para asegurar una resistencia adecuada del concreto a pesar de la dispersión inevitable de las dosificaciones. La norma ACI estipula que la calidad de concreto es satisfactoria si cumple lo siguiente:

- Ningún resultado de un ensayo de resistencia individual (el promedio de una par de ensayos sobre cilindros) está por debajo del valor de f'_c requerido en más de 3.5 MPa.
- El promedio de todos los conjuntos de ensayos de resistencia consecutivos es igual o mayor al valor requerido de f'_c .
- Es necesario dosificar el concreto de manera que su resistencia media usada como base para la selección de proporciones satisfactorias, sobrepase la resistencia requerida f'_c en una cantidad suficiente para garantizar el cumplimiento de los dos requisitos mencionados.

4. METODOLOGIA

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos es necesaria la ejecución de estudios basados en la aplicación de una metodología orientada, la cual se plantea en las etapas descritas a continuación:

4.1 FASE DE REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

La creación y revisión del archivo bibliográfico se desarrolló en la totalidad del tiempo de ejecución del proyecto. Como fuentes de documentos se consulta la base de datos en red sciencedirect, material bibliográfico recopilado en la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, incluyendo libros, proyectos de grado y revistas especializadas, así como material certificado de circulación libre en internet. Estas bibliografías no solo proporcionan procedimientos metodológicos en la elaboración de la caracterización de cada ensayo si no en la contextualización de aspectos geológicos en el marco del área estudiada.

4.2 FASE DE CAMPO

La fase de campo se realizó en la cantera TRITUPISVAR del municipio de Santa Marta, Magdalena, a la cual se efectuó una visita técnica para ejecutar la extracción del agregado pétreo a estudiar, como la de observar el proceso de extracción, trituración y fabricación del material.

En el trabajo de campo se seleccionaron las muestras a trabajar con el fin de lograr todo el aprovechamiento industrial a estos agregados pétreos al determinar

si presentan características viables en el área de la construcción, como su calidad, durabilidad y resistencia. Como también se recopiló información geológica de la cantera Tritupisvar para conocer las litologías presentes.

La recolección de muestras de la cantera Tritupisvar incluyó dos bloques de 55 cm. x 35 cm. x 45 cm. con el fin de tener suficiente material para la realización de todos los ensayos. Las muestras recolectadas fueron trasladadas desde la cantera hasta la ciudad de Bucaramanga (Santander).

4.3 FASE DE PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Una vez recibido los bloques de roca en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander, enviadas por la Cantera y Trituradas Pisvar y cia. Ltda. “TRITUPISVAR” ubicada en la ciudad de Santa Marta, son transportadas por carreta hacia el edificio Planta de Aceros donde funcionan los laboratorios de la escuela de Metalurgia, (Figura 3a). Una vez descargado los bloques de roca en un área previamente purgada, se separan según su origen y se contrata personal capacitado para empezar a partir los bloques con una porra de 16 libras hasta dejarla en un tamaño ideal que pueda ser pasado en una trituradora, (Figura3b).

Se dispone a triturar las muestras en la trituradora de mandíbulas **BB 200 RETSCH** previamente purgada que se encuentra en el Laboratorio de Molienda y Trituración de la Escuela de Geología, (Figura 3c). Se determina Según Norma Icontec 174 (ASTM C-33) el tamaño de agregado grueso para un concreto simple. Se trabajara las muestras de estudio en un tamaño de 19 mm en promedio, (Figura 3d).

Se obtiene un saco de material triturado para cada tipo de roca de tamaño máximo de 19 mm, los cuales son transportados hacia el laboratorio de hormigón

simple de la Escuela de Ingeniería Civil para su posterior análisis por los métodos de ensayo descritos anteriormente para conocer sus propiedades físicas y mecánicas.

Figura 3. a) Bloques de roca a analizar. b) Tamaño de las rocas partidas con una porra de 16 libras. c) Maquina de trituración de mandíbulas BB 200 RESTSCH y proceso de trituración de las muestras para obtener un tamaño promedio de 19 mm. d) Material triturado.



Fuente: Autores

4.4 FASE DE CARACTERIZACIÓN

Se realizaron una serie de pruebas y ensayos a lo largo de esta fase, que permitieron caracterizar el agregado para establecer su nivel de efectividad antes de la elaboración de los cilindros de concreto.

4.4.1. Procedimiento para el ensayo de la Norma ASTM C295

La roca debe ser examinada para determinar su litológica; dureza, porosidad, el tamaño de grano, la textura, y la presencia de componentes de reacción nociva en el hormigón, como por ejemplo determinar si están formados por minerales de arcilla o de otros minerales en tamaños de arcilla. La información puede obtenerse por pruebas de examen visual utilizando Lupa Microscópica NIKON Inc. High Intensity iluminator, NI-15 y realizando sección delgada de la roca. La preparación de secciones delgadas se llevó a cabo en el laboratorio de Preparación de muestras Geológicas y su posterior análisis petrográfico en laboratorio de Microscopios de Luz transmitida de la Escuela de Geología, (Figura 4a).

Figura 4. a) Análisis petrográfico en el microscopio de luz transmitida marca Nikon y toma de fotos de los minerales presentes.



Fuente: Autores

4.4.2 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 77 (ASTM C-33)

Conforme a lo estipulado por la norma, se procedió a realizar el ensayo requerido para determinar la granulometría de las muestras para concreto. Las muestras trituradas pasan a ser tamizadas por unas mallas de tamices de 1", 3/4", 3/8", No 4 y No 8 (Figuras 5a y 5c). Según la norma debe tener una masa según el tamaño de las partículas, para las muestras SM-1 y SM-2 con un tamaño promedio de 19 mm se toma una masa de 11000 gramos por cada una (Figura 5b). Después de tamizar cada muestra, estas son separadas según el material retenido por cada tamiz (Figura 5d). El material retenido en cada tamiz se pesa en una balanza y los resultados de este análisis se presentan de forma tabulada.

Figura 5. a) Tamices 1", 3/4", 3/8", No4, No 8 en forma descendente. b) y c) Proceso de tamizado para cada muestra. c) Material retenido en cada tamiz.



Fuente: Autores

4.4.3 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 92 (ASTM C-33)

Método para determinar el peso unitario de los agregados, según la norma para este método se pesan 5000 gramos de cada muestra en estudio en una balanza de exactitud 0.1% (respecto al material usado). Se utiliza una varilla compactadora de acero, cilíndrica, de 16 mm de diámetro con una longitud de 600 mm. Un extremo debe ser semiesférico, un recipiente metálico y cilíndrico (Figura 6a) y la capacidad del recipiente utilizado en el ensayo depende del tamaño máximo de las partículas del agregado que se va a medir.

Para medir el peso unitario de los agregados se utiliza el método suelto que consiste en colocar el agregado en el recipiente en tres capas, hasta colmarlo para luego ser pesado (Figuras 6b y 6c) y el de apisonado que es el mismo procedimiento solo que en cada una de las capas emparejadas con la mano se apisona con una varilla dando 25 golpes distribuidos uniformemente en cada capa evitando que la varilla golpee el fondo del recipiente, utilizando el extremo semiesférico de la varilla y una vez colmado el recipiente se enrasa la superficie con la varilla usándola como regla para luego determinar la masa del recipiente (Figuras 6d y 6e). Las dos pruebas se realizan tres veces y se saca promedio de los pesos obtenidos (Figura 6f). El peso de los dos agregados se determina con las formulas expresadas en la norma.

Figura 6. a) Peso del medidor vacío, del medidor vacío con vidrio y peso del medidor con agua y vidrio. b) y c) Método suelto para determinar peso unitario. d) y e) Método de apisonado para determinar peso unitario. f) Se pesa cada tipo de roca triturada tres veces y se saca promedio.



Fuente: Autores

4.4.4. Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 176 (ASTM C-127)

Método para determinar la densidad y absorción de agregados gruesos. Según la norma se pesa 5000 gramos de cada muestra pesados en una balanza de exactitud 0.1% y se sumergen en agua durante 24 horas para eliminar polvo o material adherido a sus superficies (Figura7a). Luego se seca la muestra del recipiente de inmersión y se envuelven en una toalla hasta que sean eliminadas las películas visibles de agua en las superficies de los componentes de la muestra, teniendo en cuenta que los componentes grandes deben secarse individualmente (figura7b). Se utiliza una canasta de alambre construida con malla de alambre de aberturas comprendidas entre 2 mm y 4 mm. Sus dimensiones aproximadas deben ser 200 mm de diámetro 200 mm de altura. Debe tener un dispositivo adecuado para que pueda ser suspendida del centro del platillo de la balanza. El recipiente de inmersión debe tener forma y dimensiones adecuadas para la inmersión total de la canasta en agua (figura7c).

Después de medir la muestra, esta se coloca en estado de saturación interna y seca superficialmente en la canasta de alambre y se determina su peso sumergida en agua (figura7d). Se introduce la muestra en un horno a una temperatura entre 100⁰C y 110⁰C hasta que su masa sea constante. Se deja enfriar hasta la temperatura ambiental entre 20⁰C y 25⁰C y se determina su masa

Figura 7. a) Material sumergido en agua durante 24 horas para eliminar polvo o material adherido a sus superficies. b) Procedimiento para secado del material para eliminar las películas de agua superficiales. c) Canasta de alambre que va a ser sumergida en agua para su toma de peso. d) Peso de cada roca triturada sumergida en agua.



Fuente: Autores

4.4.5 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 126

Método para determinar la resistencia de los agregados a los ataques de sulfato de magnesio. Según la norma la muestra destinada al ensayo se encuentra retenida en el tamiz 19 mm., la cual según la tabla 16, requiere de 1500 g para cada tipo de muestra y el procedimiento a seguir es el siguiente:

Se disuelve sulfato de magnesio anhidro (MgSO_4) o hidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) químicamente puro en una cantidad de agua destilada entre 25°C y 30°C . La solución debe agitarse enérgicamente durante la adición de la sal y a intervalos frecuentes hasta el momento del ensayo. Se enfría a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ y se mantiene a esta temperatura por lo menos 48 horas antes del ensayo.

Se coloca la muestra en el recipiente de inmersión y se sumerge en la solución satura de sulfato de magnesio durante un periodo de 16 a 18 horas, teniendo la precaución que la superficie de solución quede por lo menos 15 mm por encima de la muestra. Se tapa el recipiente con el fin de reducir a un mínimo la evaporación y evitar el exceso de sustancias extrañas. Las muestras deben estar a una temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$ durante el periodo de inmersión.

Después del periodo de inmersión se retira el recipiente con la muestra, se deja que el líquido escurra durante 15 ± 5 minutos y se coloca en el horno entre 105°C y 110°C , durante 5 horas y posteriormente se repite el mismo procedimiento de inmersión en la solución y secado. Cuando la muestra debe ser sometida a otro ciclo de inmersión, se mantiene a la temperatura ambiente después de que ha sido secada. Se realizan cinco ciclos.

La pérdida de masa se determina por la diferencia de masa de los trozos que durante el ensayo no se hayan roto en más de tres partes. La norma específica que para muestras atacadas con sulfato de magnesio la pérdida de masa no debe superar el 15% (Figuras 8a y 8b).

Tabla 16. Masa requerida por tamaño de partículas.

Pasa tamiz ICONTEC	Retiene tamiz ICONTEC	Cantidad necesaria en gramos	
		Parcial	Total
64 mm.	50,8 mm.	1500	3000
50,8 mm.	38,1 mm.	1500	
38,1 mm.	25,4 mm.	1000	1500
25,4 mm.	19 mm.	500	
19 mm.	12,7 mm.	670	1000
12,7 mm.	9,51 mm.	330	
9,51 mm.	4,76 mm.	---	300

Fuente: Norma Icontec 126.

Figura 8. a) Después del periodo de inmersión se coloca en el horno por cinco horas. b) Las muestras se dejan enfriar a temperatura ambiente para luego pesarlas.



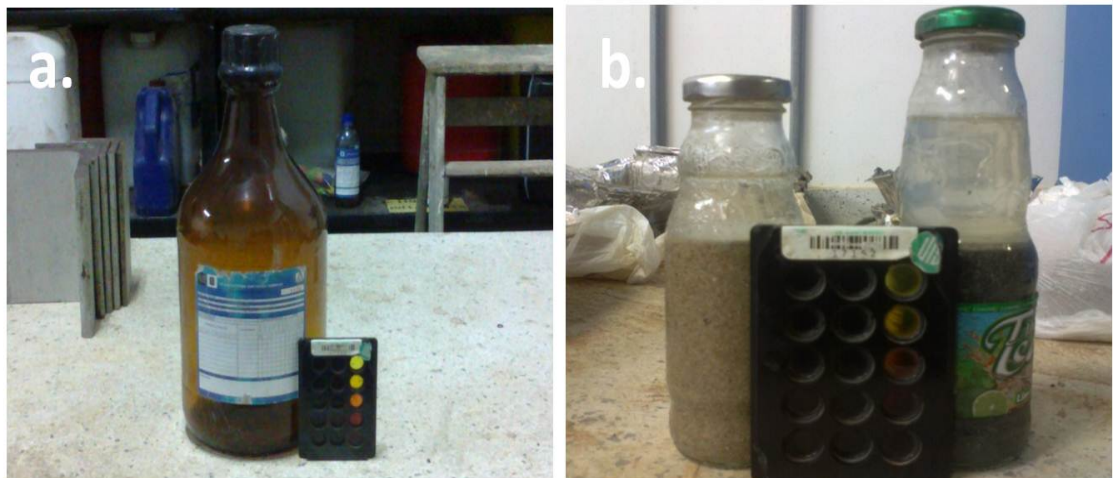
Fuente: Autores

4.4.6 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 127

Método para determinar el contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros u hormigones. La norma especifica que para este ensayo se necesita el agregado en tamaño arena.

Se trituró el agregado hasta dejarlo en tamaño arena y se depositó en frascos de vidrio incoloro, de unos 350 cm³, con tapas a un volumen de 130 cm³ para luego añadirle una solución de hidróxido de sodio hasta que el volumen total de la arena y el líquido después de agitado, sea igual a 200cm³ aproximadamente, ver figura 3u. Se tapa el frasco, se agita vigorosamente y se deja reposar por 24 horas. Luego se mide por medio de un colorímetro la cantidad de materia orgánica (Figuras 9a y 9b).

Figura 9. a) Solución de hidróxido y tabla colorimétrica. b) Después de 24 horas se observa que las muestras no presentan afectación según la tabla colorimétrica.



Fuente: Autores

4.4.7 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 1776

Determinación del contenido de humedad total de las muestras estudiadas por medio del secado. Según la norma este método consiste en someter una muestra de agregado a un proceso de secado que dura 24 horas (figura 10a). Se compara su masa anterior y después del secado para determinar el porcentaje de humedad total (Figuras 10b y 10c). Se tomaron 2000 gramos de cada muestra del agregado a analizar

Figura 10. a) Las muestras se secan al horno por 24 horas. b) Muestras secadas a temperatura ambiente. c) Se pesa las muestras.



Fuente: Autores

4.4.8 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 98 (ASTM C-131)

Determinación de la resistencia al desgaste de los tamaños menores de los agregados gruesos, utilizando la máquina de Los Ángeles (Figura 11a). La muestra destinada al ensayo se obtiene preparando por tamizado las distintas fracciones del agregado. Se mezclan las fracciones según tabla 12 hasta completar unos 5000 gramos de muestra. Por el tipo de granulometría obtenido de la norma Icontec 77(ASTM C-33), el tipo de abrasión aplicada a cada una de las muestras a analizar fue de tipo B.

Se introducen 11 esferas (Figura 11b) al tambor junto con el agregado se hace girar este con una velocidad de 1000 revoluciones (Figura 11c), hasta completar 500 vueltas. La velocidad angular debe ser constante. Se retira el material del cilindro y se hace pasar por el tamiz ICONTEC 1,68 mm., según lo establecido en la Norma Icontec 98 (Figuras 11d, 11e y 11f). El material retenido en el tamiz ICONTEC 1,68 mm, debe ser lavado, secado en la estufa a una temperatura comprendida entre 105⁰C Y 110⁰C y su masa medida.

Figura 11.a) Maquina de los ángeles. b) Esferas utilizadas en el ensayo. c) Se enciende la maquina una vez introducidos las esferas, el material y sellada a una velocidad de 1000 revoluciones. d) Tamiz No12. e) y f) Se tamiza cada muestra con el tamiz No12 y el material retenido en este se pesa para determinar el porcentaje de desgaste.



Fuente: Autores

4.4.9 Procedimiento para el ensayo de la Norma Icontec 175 (ASTM C-289)

Esta Norma tiene como objeto establecer el método químico para determinar la reactividad potencial de un agregado con los álcalis del cemento portland. Se realizó este ensayo en el laboratorio 222 de Consultas Industriales de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, edificio Camilo Torres. Sin embargo por su alto costo económico solo se determinó el porcentaje de sílice de cada muestra por el método gravimétrico. La muestra se pulveriza en la trituradora de mandíbulas **BB 200 RESTSCH** y se pasa por un tamiz N° 200 (figura 4g), se deposita 30 g. en un frasco plástico (Figuras 12a, 12b y 12c).

Figura 12. a) Cada muestra se pulveriza en la trituradora de mandíbulas BB 200 RESTSCH, se pasan por un tamiz No 200. b) y c) Se depositan 30 g de cada muestra en un recipiente plástico y se pesa cada una.



Fuente: Autores

4.4.10 Procedimiento para la preparación del concreto

Con los resultados obtenidos del análisis completo de agregados gruesos contenidos en las Normas Icontec o ASTM, se procedió con el diseño teórico de mezcla para cada una de las muestras de agregados pétreos en estudio, el cual lo realizó el técnico del laboratorio de hormigón simple, teniendo en cuenta que el diseño está sugerido para agregados en condición seco-saturados. Para evaluar el diseño propuesto, se obtuvieron 19 cilindros para su control de resistencia con el ensayo a compresión que se realizó en el Laboratorio de Resistencia de materiales de la escuela de Ingeniería Civil. Dichos ensayos se realizaron a edades de 7, 14 y 28 días, tomando dos cilindros de cada agregado y de la mezcla de ellos para cada edad.

Es de tener en cuenta que el análisis realizado en este proyecto se enfoca en determinar el comportamiento de propiedades mineralógicas, físicas, mecánicas, y químicas de las muestras en estudio como agregados gruesos en mezcla de concreto. Por lo tanto para la realización de este apartado se tomó como agregado fino, arena previamente caracterizada en el laboratorio de hormigón simple y que es usada por el técnico para los diferentes ensayos de laboratorio. Se quiere determinar la resistencia para cada tipo de agregado pétreo ígneo (pegmatita) y metamórfico (Anfibolita) y la mezcla de los dos en proporción 50/50. A continuación se detalla el diseño de mezcla, especificando las proporciones de materiales para la elaboración del concreto en las tablas 17, 18 y 19.

Tabla. 17. Resistencia solicitada y asentamiento o SLUMP

Resistencia Solicitada	3000	PSI	210	Kg/cm ² a los 28 días
Consistencia Requerida	3			Pulgadas de SLUMP

Tabla 18. Resultados obtenidos de los agregados

Agregado Grueso			
Muestra	SM-1	SM-2	Unidades
Peso específico (SSS)	2,9	2,6	Kg/ m3
Peso Unitario (SSS)	537,09	500,62	Kg/ m3
Absorción Máxima	0.64	0,81	%
Tamaño Máximo	¾"	¾"	Pulgadas
Agregado fino			
Peso específico (SSS)	2,65		Kg/ m3
Peso Unitario (SSS)	1560		Kg/ m3
Absorción Máxima	2,0		%
Modulo de finura	2,0		

Tabla 19. Diseño de mezcla por metro cúbico de Concreto

	Peso, Kg.	Volumen, litros
Agua		0.2
Cemento portland, tipo I	0.4	
Agregado fino	0.8	
Agregado grueso	1.12	

Una vez obtenido el diseño de mezcla se procede a pesar las cantidades requeridas de agregado grueso, fino, cemento y agua para la mezcla de concreto (Figura 13a). Los materiales a utilizar en este ensayo son 19 moldes que fueron previamente purgados de diámetro de 10.5 cm y altura 21 cm. Una pala, palustre, probeta, bandeja de mezcla, agua, varilla compactadora y una brocha de pintar sin usar. Se deposita primeramente en la bandeja de mezcla la arena y se le hace una abertura con la mano donde se le agrega el cemento y se empieza a mezclar para luego incorporarle el agregado se obtenga una mezcla homogénea a la hora

de adicionarle agua. Una vez incorporados todos los materiales y el agua se mezcla hasta tener un concreto en un estado plástico adecuado.

Los moldes de PVC son cubiertos en su interior con ACPM, mediante una brocha para que cuando se le adicione el concreto este no se pegue cuando se endurezca (Figura 13b). El concreto se coloca en tres capas en los moldes usando el método de apisonado (Figuras 13c y 13d). Cada una de las capas se empareja y se apisona con 25 golpes de varilla distribuidos uniformemente evitando que la varilla golpee el fondo y al apisonar las capas superiores se aplica la fuerza necesaria para que la varilla solamente atraviese la respectiva capa. Una vez colmado el molde se golpea a los lados cinco veces y se enrasa con la varilla, usándola como regla. Se dejan los moldes en un lugar seco a temperatura ambiente para el curado del concreto (Figura 13e). Pasado un día de haber depositado el concreto en los moldes se dispone a sacarlo mediante un compresor de aire. Una vez realizado esta labor se procede a ensayar las probetas a los 7, 14 y 28 días según norma. Se toman seis probetas correspondientes a dos moldes para cada tipo de agregado y la mezcla de ellos. Se llevan al laboratorio de resistencia de materiales para ensayar las muestras (Figuras 13f, 13g y 13h).

Figura 13. a) Se observa la mezcla de la arena, agregado y agua con el cemento. b) Los moldes de PVC son cubiertos con ACPM. c) y d) Llenado de los moldes. e) Los moldes se dejan en un lugar seco y plano para su curado de un día. f) Se ajustan los cilindros a la máquina. g) Se inicia el proceso de compresión. h) Todos los cilindros ensayados.





Fuente: Autores

4.5 FASE DE INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Teniendo recopilado todos los datos de cada ensayo estos fueron sometidos a un proceso de elaboración técnica y operaciones estadísticas, para posibilitar su interpretación. Se realizó un método comparativo según los estándares establecidos elaborando representaciones gráficas y tabulaciones. Finalmente se establecen conclusiones.

4.6 FASE DE ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Finalmente, durante esta fase se realizó la preparación del informe final del proyecto, el cual presenta los resultados de la investigación.

5. RESULTADOS

5.1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA CANTERA TRITUPISVAR

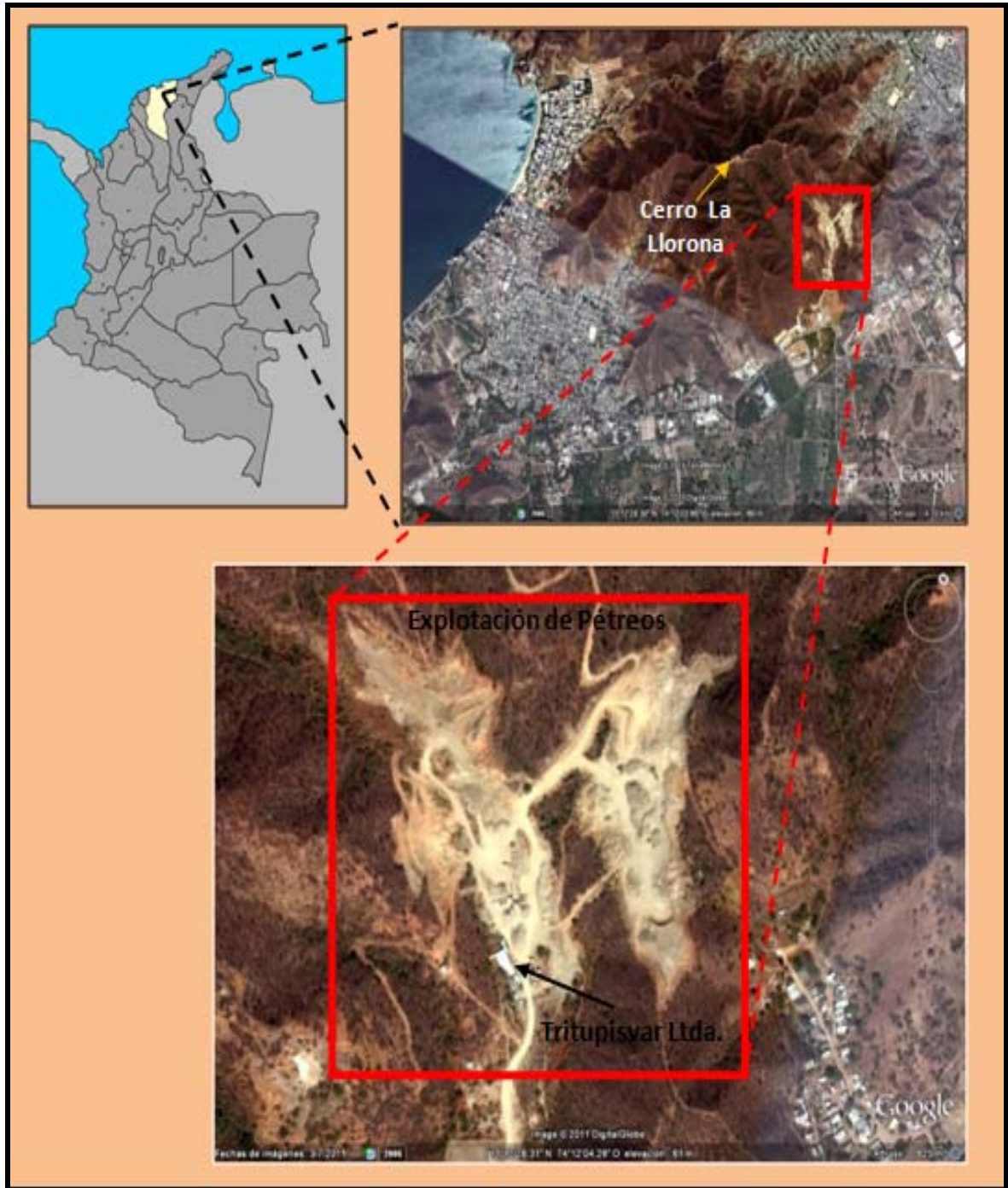
Se presenta a continuación la información geográfica y geológica de la zona donde se extrajeron las muestras de roca para su análisis en este proyecto con el fin de lograr todo el aprovechamiento industrial de estos agregados pétreos.

5.2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La cantera Tritupisvar se ubica en el departamento del Magdalena en la ciudad de Santa Marta. Se localiza entre las coordenadas planas de $X_1= 985.000$ y $X_2= 987.000$; y $Y_1=1.731.000$ y $Y_2= 1.732.000$ y en la plancha 11.

Por su posición estratégica en la zona rural del distrito de Santa Marta, le permite ser punto de fácil acceso desde la Troncal del Caribe la cual comunica las ciudades de Santa Marta, Barranquilla y Riohacha (Figuras 14 y 15).

Figura 14. Esquema que muestra la localización regional y local del área de estudio.



Fuente: Imagen Satéltital tomada desde Google Earth.

Figura 15. Vías de acceso a la Cantera. Imagen Tomada de Google Earth.

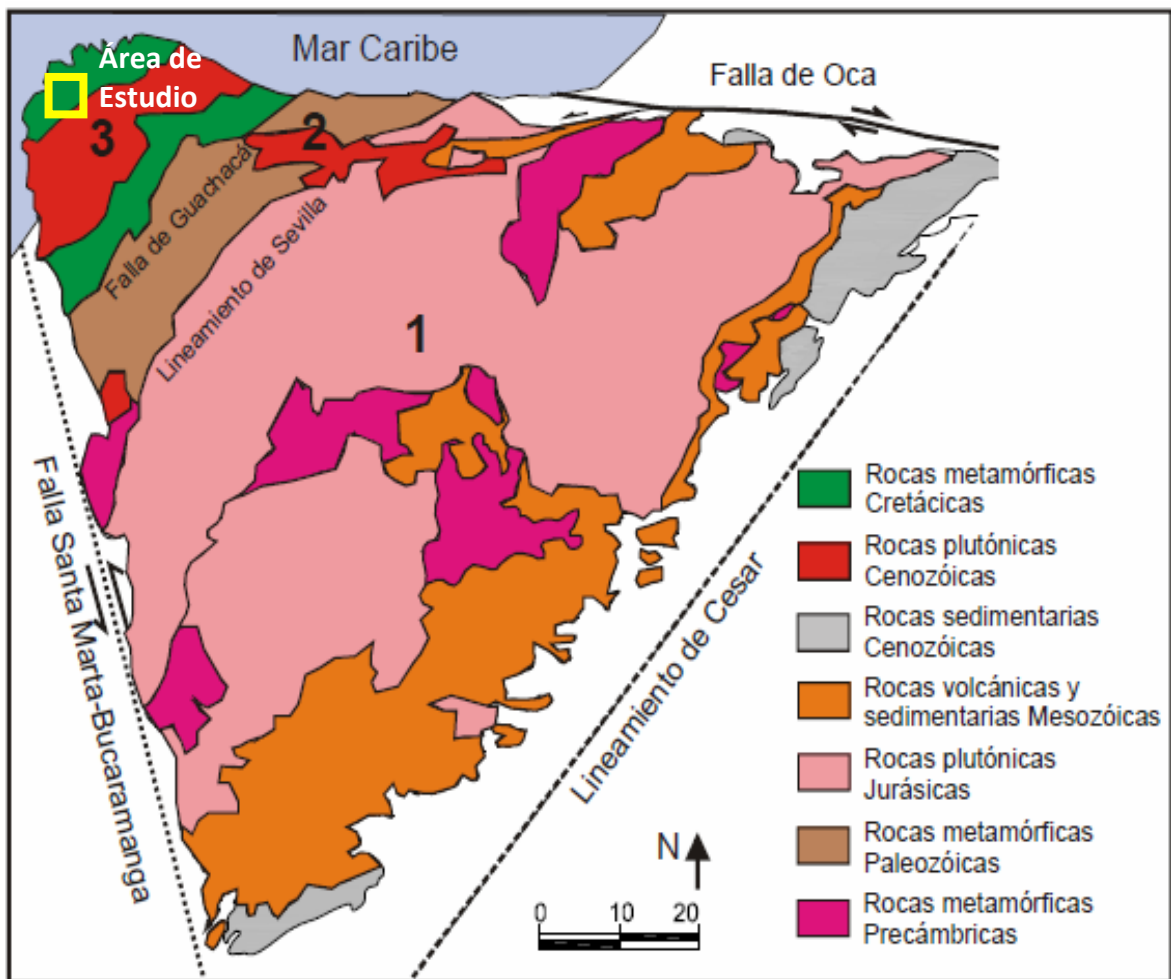


5.3 LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA REGIONAL

La cantera Tritupisvar se encuentra ubicada en el pie del cerro La Llorona al borde occidental de la provincia geotectónica denominada Santa Marta y se encuentra representada por el cinturón metamórfico de Santa Marta, el cual consta principalmente de anfibolitas, esquistos anfibólicos micáceos, filitas y esquistos cuarzosos y grafitosos dispuestos en fajas de tendencia noreste, agrupados por (Tschanz, 1969) en las formaciones esquistos de Gaira, esquistos de San Lorenzo y Filitas de Taganga; un estudio más detallado, (Doolan, 1970) clasifica este cinturón en cuatro formaciones: formación Concha, formación Punta Betín, formación Cinto y formación Rodadero. Otros rasgos litológicos de la provincia Santa Marta, es el cuerpo intrusivo conocido como el Batolito de Santa

Marta, de composición principalmente cuarzo- diorítica, emplazado durante el paleógeno en un ambiente de arco magmático, el cual parece mostrar una gradación con facies félsicas hacia el oeste y más intermedias hacia el este. Además, intrusiones graníticas forman pequeños cuerpos, y diques pegmatíticos que atraviesan tanto las rocas metamórficas como al batolito intrusivo, (Ingeominas, 1988), (Figura 16).

Figura 16. Mapa geológico de la Sierra Nevada de Santa Marta, en el cual se observan las principales provincias geotectónicas, y el área de estudio aproximada.



Fuente: Duque 2009.

5.4 GEOLOGÍA LOCAL DE LA CANTERA TRITUPISVAR

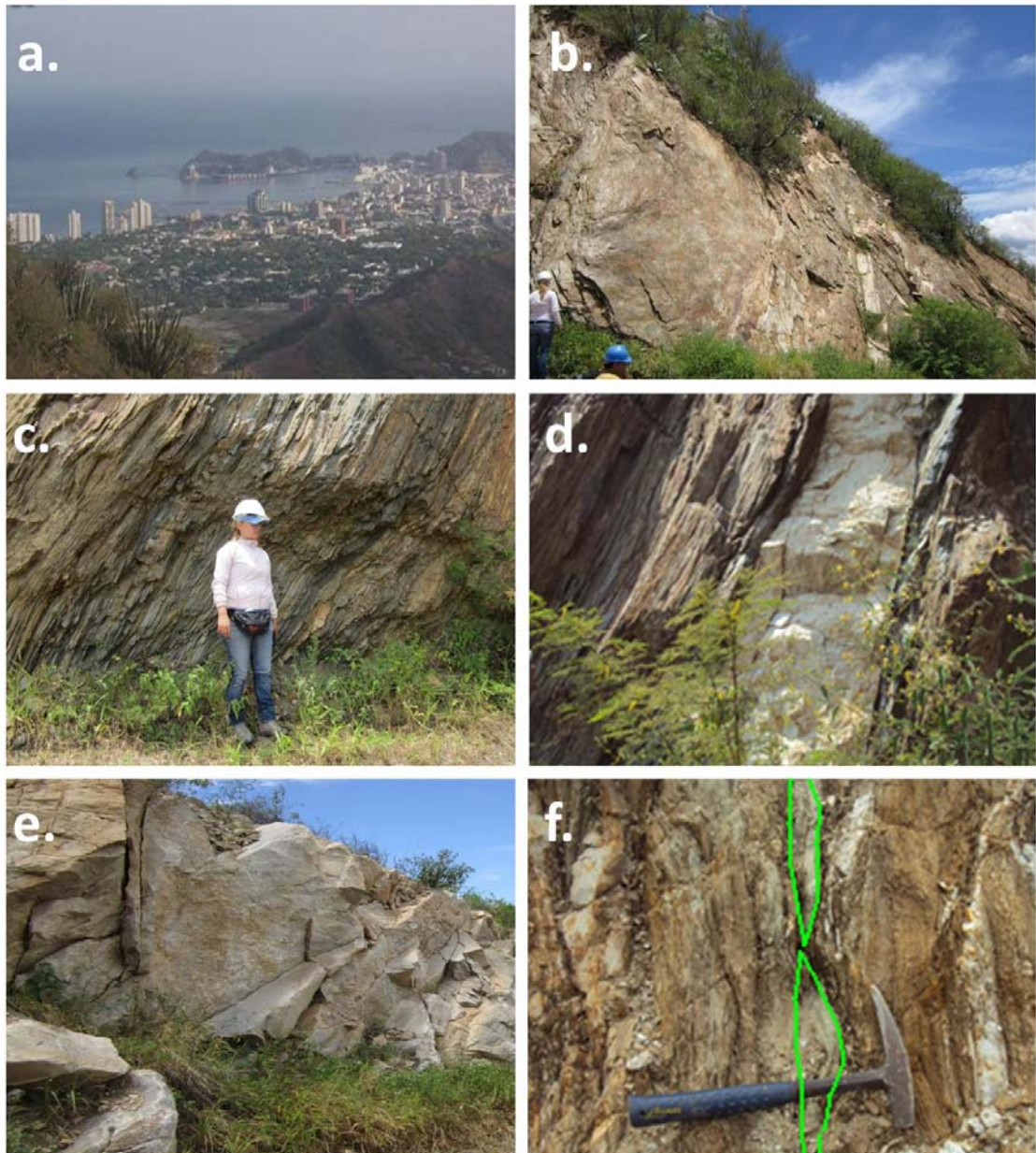
Desde el cerro La Llorona es posible apreciar una excelente panorámica de la Bahía de Santa Marta, (figura 17a). Realizando un recorrido en dirección a las oficinas de la empresa en la parte media alta se encontraron intercalaciones de esquistos anfibólicos micáceos y esquistos anfibólicos y biotíticos con una lineación plano paralela ligeramente ondulosa (figuras 17b y 17c), con muchas venas de pegmatitas que la cortan en forma de lenticulos los cuales siguen la foliación de los esquistos, algunos diques granodioríticos en ocasiones foliados que van desde unos 20 cm. hasta unos 2 m. Unos de estos siguen la foliación de la roca mientras que otros la cortan a ángulos aproximados de 45° , también venas de cuarzo que no superan los 10 cm. de espesor y que siguen la dirección de foliación.

En esta zona los diques compuestos de rocas ígneas de grano medio a fino de contenido más félsico, se encuentran siguiendo la dirección de foliación de los esquistos. Presentan foliación por lo cual se podría afirmar que instruyeron en la etapa final del metamorfismo o del proceso de formación de la roca metamórfica. Además en la medida que se está más cerca del Plutón principal el contenido en cuanto a su tamaño y la frecuencia de estos cuerpos graníticos aumenta.

En la parte media se observa un dique granodiorítico de 17 m de espesor (figura 17e), luego continúa con intercalaciones de esquistos anfibólicos micáceos y esquistos anfibólicos y biotíticos los cuales también presentan diques granodioríticos de menor espesor foliados (figura 17d). Existe predominancia absoluta de los esquistos anfibólicos y micáceos (figura 17f y 17g) a pesar que aumenta la cantidad de diques granodioríticos.

Figura 17. a) Panorámica de la bahía de Santa Marta. b) Esquistos anfibólicos micáceos c) esquistos anfibólicos con esquistos anfibólicos

biotíticos con lentes cloríticos e intrusiones concordantes con la foliación.
d) Esquistos anfibólicos intruidos concordantemente por dique monzogranítico. e) Dique granodiorítico. f) esquistos biotíticos con lentes cloríticos e intrusiones concordantes con la foliación.



Fuente: Autores

También se observa un aumento en la cantidad y frecuencia de diques pegmatíticos que corresponden a rocas eruptivas filonianas formadas por cristales de cuarzo y feldespato y otros minerales como la moscovita. Y se aprecia la presencia de enclaves probablemente de biotita dentro del cuerpo plutónico.

Los esquistos continúan con laminación plano paralela ligeramente ondulosa que en algunas secciones presenta venas de cuarzo no mayores a 1 cm. de espesor las cuales se encuentran separadas entre sí aproximadamente 10 cm. una de la otra en forma de lentes y siempre siguiendo la dirección de foliación. Además empiezan a aparecer algunos esquistos actinolíticos aunque ninguno supera los 50 cm. de espesor.

En la parte media baja del cerro la Llorona hay intercalaciones de esquistos anfibólicos, micáceos y cuarzo feldespáticos donde la litología que más predomina son los esquistos micáceos (Figura 8h), presentan venas de cuarzo que se encuentran en forma de lentes menores a 10 cm. de espesor. También se observan esquistos actinolíticos y tremolita muy alterados y meteorizados pero presentan su hábito fibroso. Se tienen venas de pegmatita donde aumenta el contenido de micas y diques de granodiorita perteneciente al Batolito de Santa Marta (figura 8j). Se observa un afloramiento del cual se extraía talco, ver figura 8i. Además se encontró la presencia de yeso en su hábito fibroso y aparece en contacto con los esquistos actinolíticos y tremolíticos, (Figura 8k). Hay que destacar la presencia de bloques de anfibolita con stockworks de magnesita. Luego se encuentra un mayor aumento en las intrusiones granodioríticas terminando la parte más baja del cuerpo, con solo material ígneo foliado que ha sido intruido por diques de un cuerpo porfirítico y venas de pegmatitas que han disminuido su presencia.

Hacia la parte occidental del frente de explotación (figuras 8m, 8n y 8ñ) se encuentra una mina abandonada de magnesita, en la cual se aprecian esquistos

micáceos, delgadas intercalaciones de esquistos tremolíticos actinolíticos con una foliación metamórfica ondulosa dentro de los cuales se observan venas de pegmatita paralelas a la foliación de la roca, así como también un entrecruzado de vetillas o “stockwork” de magnesita (figura 8l), localmente deformadas. La magnesita es criptocristalina, masiva, de color blanco, y se presenta en vetillas en rocas ultrabásicas serpentinizadas formada a partir de la serpentina.

El origen de las vetillas se atribuye a relleno de aberturas y posiblemente reemplazamiento en zonas de diaclasas. La mineralización puede atribuirse a procesos hidrotermales en los que por acción de cuerpos ígneos sobre las rocas ultrabásicas serpentinizadas, se generaron fluidos ricos en CO₂ y con capacidad de lixiviar gran parte del magnesio de las serpentinitas.

Figura 18. g) Esquistos anfibólicos. h) Intercalación de esquistos anfibólicos y micáceos con presencia de un lente no mayor a 50 cm. de espesor de esquisto actinolíticos. i) Afloramiento donde antiguamente se explotaba talco. j) Granodiorita que hace parte del Batolito de Santa Marta con presencia de una vena de cuarzo que la corta. k) Esquistos actinolíticos con presencia de talco. l) venas de magnesita. m)y n)) Frente de explotación de la cantera.





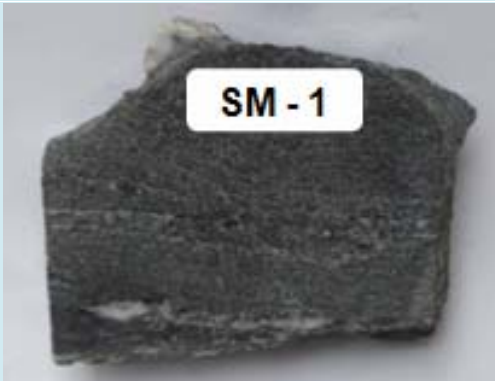
Fuente: Autores

5.5 ANÁLISIS PETROGRÁFICO

El método sugerido para la descripción petrográfica de las rocas se llevó a cabo en el laboratorio de Microscopía de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Se determina mediante las guías de petrografía ígnea y metamórfica la composición mineral, características texturales y determinación de su nombre. El análisis de secciones delgadas se realizó siguiendo la guía de mineralogía óptica, y los atlas mineralógicos de (Thompson & Thompson, 1987 y Ríos & Castellanos 1998).

5.5.1 Descripción en muestra de mano. Se presenta en las tablas 20 Y 21 la descripción macroscópica de las rocas analizadas

Tabla 20. Análisis macroscópico de la muestra objeto de estudio SM-1.

Muestra	SM-1
Nombre de la Roca	Anfibolita
Tipo de Roca	Metamórfica
Composición Mineralógica	Plagioclasa 35%, Hornblenda 30%, Cuarzo 19%.
Textura de la Roca	Granonematoblástica, con orientación desarrollada por minerales prismáticos tabulares (Hornblenda) y alargados (Plagioclasa y Cuarzo).
Foto: Muestra de mano	

Fuente: Autores

Tabla 21. Análisis macroscópico de la muestra objeto de estudio SM-2.

Muestra	SM-2
Nombre de la Roca	Micropegmatita
Tipo de Roca	Ígnea Hipoabisal
Composición Mineralógica	Plagioclasa 55%, Cuarzo 28%
Textura de la Roca	Fanéritica, alotrimórfica-inequigranular con distribución granulométrica de tipo unimodal
Foto: Muestra de mano	

Fuente: Autores

5.5.2. Descripción en sección delgada.

Sección SM-1

Nombre de la roca: Anfibolita

Minerales Principales: Plagioclasa, Hornblenda,

Minerales Secundarios: Cuarzo, Esfena y Zoisita.

Estructura de la roca: Bandeada presenta minerales prismáticos tabulares con orientación preferente que forman diferente espesor alternándose con minerales como Cuarzo y Plagioclasa.

Plagioclasa (35%): Individuos incoloros, de relieve bajo, birrefringencia baja, grises de primer orden, heteroblásticos, subidioblásticos, distribución homogénea, presenta macla tipo Albita y Carlsbad. Se encuentra en contacto neto con el Cuarzo, Hornblenda y Zoisita.

Hornblenda (30%): Agregados de color verdoso crema con pleocroísmo débil de relieve moderado a alto (x=verde claro; Y=amarillo; z=verde pálido), presenta distribución heterogénea, con birrefringencia de segundo orden, según tamaño son homeoblásticos y según forma subidioblásticos. Se encuentra en contacto neto con la Plagioclasa, Cuarzo y la Zoisita. Está presentando en sus bordes alteración a sericita.

Cuarzo (19%): Agregados incoloros, de relieve bajo, birrefringencia gris de primer orden, según su tamaño son homeoblásticos, y según su forma subidioblásticos, están distribuidos heterogéneamente. También se encuentran rellenando venillas de origen hidrotermal. Está en contacto neto con la Plagioclasa y Anfíbol.

Zoisita (4%): Individuos incoloros, de relieve alto, birrefringencia baja, según su tamaño son homeoblásticos, y según su forma subidioblásticos, están distribuidos homogéneamente. Están en contacto reaccional con la Plagioclasa y neto con el Anfíbol.

Esfena (2%): Individuos incoloros de aspecto terroso, birrefringencia alta, relieve muy alto, según su tamaño son homeoblásticos, y según su forma son idioblásticos, distribuidos heterogéneamente. Se encuentra en contacto neto y reaccional con la Plagioclasa.

Paragénesis mineral

Plagioclasa + Anfíbol + Cuarzo

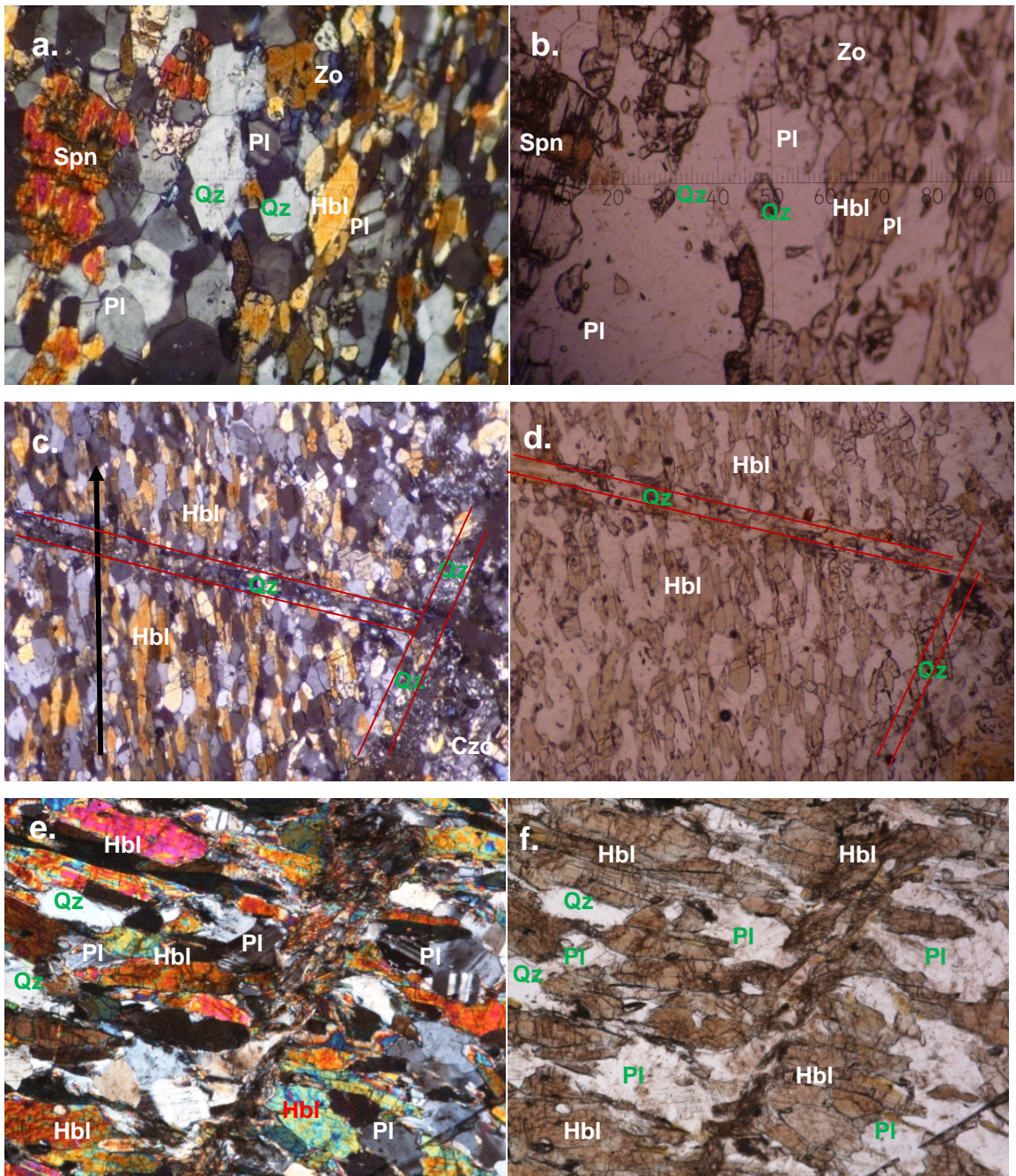
Facie

Anfibolita

Subfacie

Estauroлита-Almandino.

Figura 19. Microfotografías de la muestra SM-1 tomadas en XPL y a la derecha en PPL. En a) y b). Cristales de Plagioclasa, Hornblenda, Esfena, Zoisita y Cuarzo (Aumento 10x). En c) y d) Venillas de cuarzo y dirección de esquistosidad señalado con la flecha negra (Aumento 5x). En e) y f) Alteración de la hornblenda a sericita (Aumento 10x).



Sección SM – 2

Nombre de la roca: Pegmatita.

Minerales Principales: Plagioclasa, cuarzo,

Minerales Secundarios: Ortoclasa, hornblenda, clinozoisita.

Estructura de la roca: Masiva.

Cristalinidad: Holocristalina.

Plagioclasa 55%): Presenta cristales euhedrales a subhedrales, con alteración a sericita. La alteración se presenta en los bordes y en algunos casos en todo el cristal. Se reconoce en todos los cristales maclas tipo albita o maclas polisintéticas (con extinción de 11°) andesita (38°) y oligoclasa (20°).

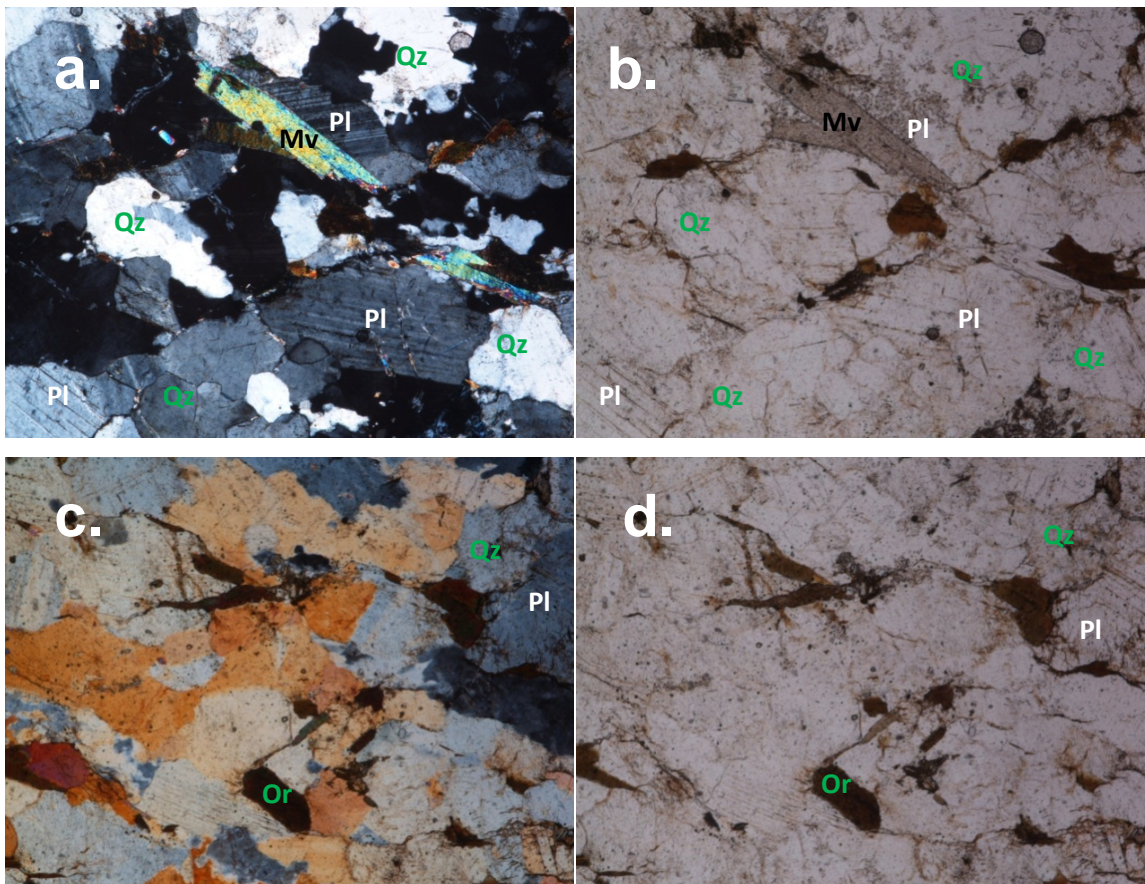
Cuarzo (28%): Presenta cristales muy pequeños de forma euhedral. Se encuentran delimitados con la Plagioclasa con un bajo relieve. Granos fragmentados con contactos suturados o penetrativos. Los cristales de mayor tamaño muestran extinción ondulatoria intensa y eventualmente con textura mirmequítica. Puede contener moscovita vermicular.

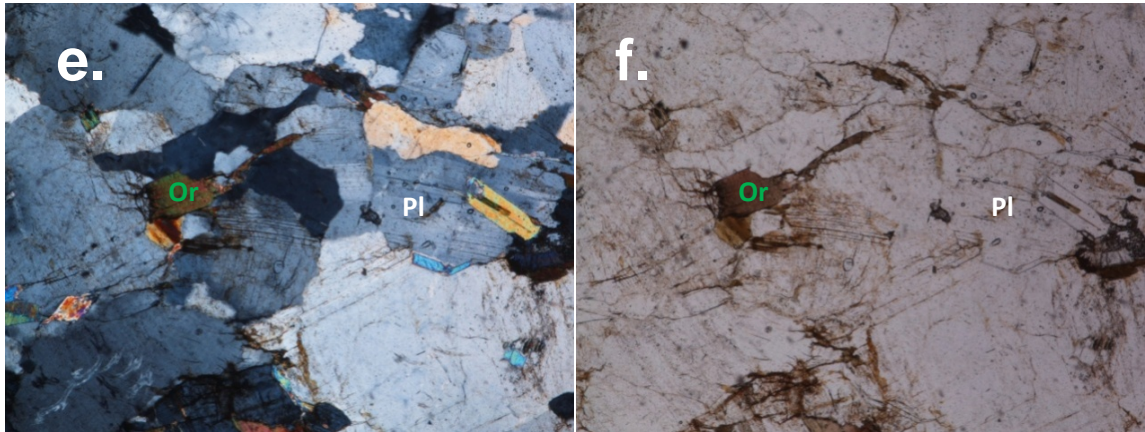
Ortoclasa (10%): Presenta un relieve bajo con forma anhedral, se observa una leve alteración a caolinita y también una variación de maclas tipo oligoclasa (con extinción de 25°), con inclusiones de hornblenda.

Hornblenda (5%): Presenta cristales subhedrales con dos direcciones de exfoliación, alto grado de fracturamiento con pleocroísmo de tonos verde a marrón y de verde oscuro a verde manzana, también se observan inclusiones de minerales de biotita, plagioclasa, cuarzo, epidota y minerales opacos. La birrefringencia de los cristales se reconoce por el color amarillo a café (0.018), amarillo pálido a verde oscuro (0.025), verde pálido a azul, verde (0.019), violeta pálido a azul (0.024).

Clinzoisita (2%): Se presenta en cristales agrupados, con hábito prismático granular y relieve alto. Exhibe colores de interferencia anómalos azul y verde amarillento. Algunas veces se observa zonación de los colores de interferencia.

Figura 20. Microfotografías de la muestra SM-2 tomadas con XLP y a la derecha PPL. En a) y b). Cristales de Cuarzo, Plagioclasa, Mica Moscovita (Aumento 10x). En c) y d). Cristales de Ortoclasa, cuarzo y plagioclasa (Aumento 10x). En e) y f). Cristales de Ortoclasa y Plagioclasa (Aumento de 10x).





Fuente: Autores

5.6 RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 77

5.6.1 Agregado Grueso muestras SM-1 y SM-2

En este apartado se presentan los resultados de los ensayos de propiedades físicas de agregado grueso según Norma Icontec 77. En las tablas 21 y 22 se encuentran tabulados los porcentajes que pasan cada tamiz del ensayo de granulometría de agregado grueso para concreto y sus límites superiores e inferiores. Los datos se encuentran representados en las curvas granulométricas (Figuras 22 y 23). Se pesa para cada tipo de muestra triturada 11000 gramos.

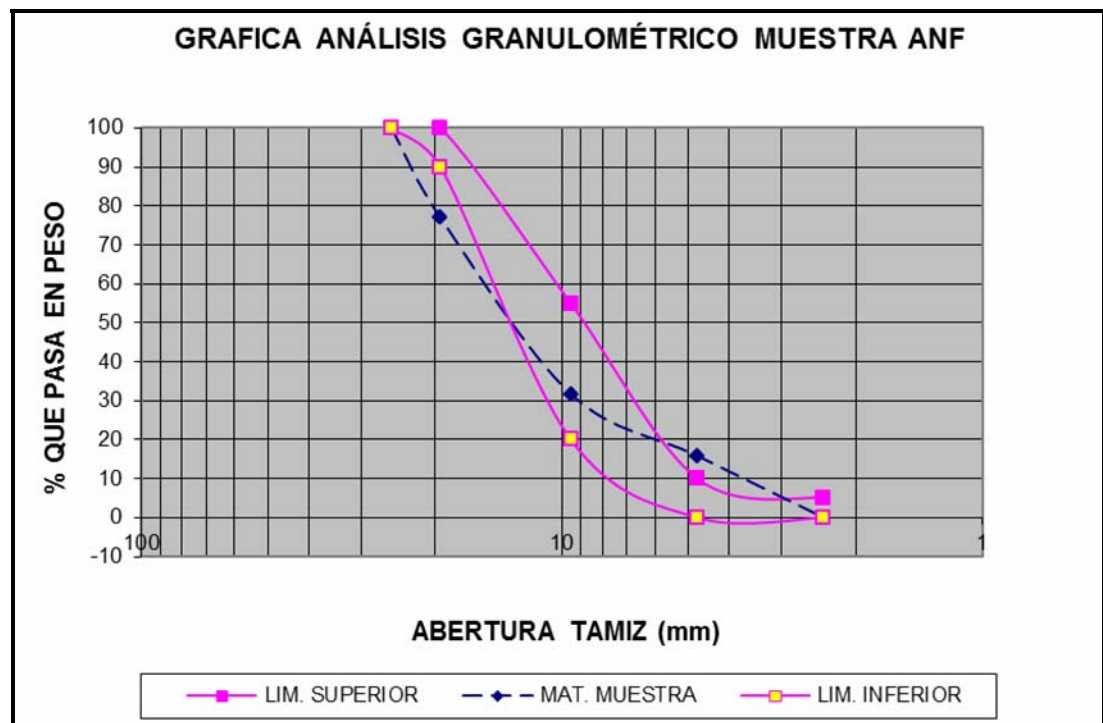
Tabla 22. Granulometría del agregado grueso de Muestra SM-1 (Anfibolita)

Muestra SM-1(Anfibolita)						
Tamiz mm.(1)	Peso retenido gramos (2)	% retenido (3)	% retenido acumulado (4)	% pasa (5)	Limite Superior	Limite inferior
25,4 mm.	0	0	0	100	100	100
19,0 mm.	2538	23,1	23,1	76,9	90	100

Tamiz mm.(1)	Peso retenido gramos (2)	% retenido (3)	% retenido acumulado (4)	% pasa (5)	Limite Superior	Limite inferior
9,51 mm.	4974	45,2	68,3	31,7	20	55
4,76 mm.	1742	15,8	84,1	15,9	0	10
2,38 mm.	1746	15,9	100,0	0	0	5
Fondo	0	0,0	100,0	0		
Total	11000	100%				

Fuente: Autores

Figura 21. Curva granulométrica de agregado grueso muestra Anfibolita



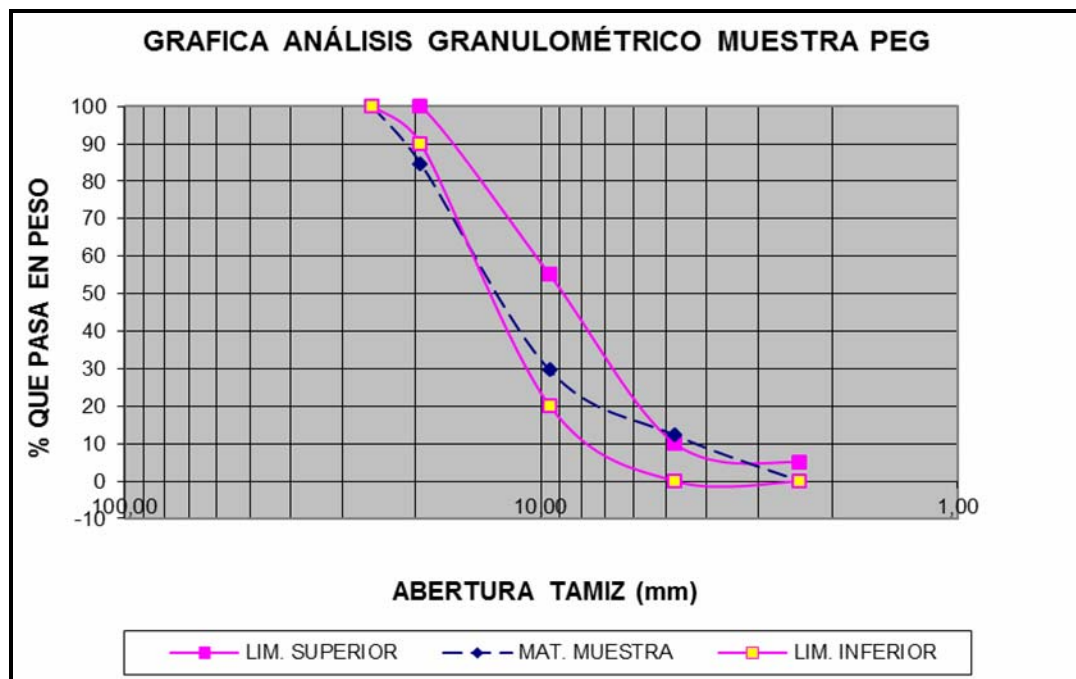
Fuente: Autores

Tabla 23. Granulometría de agregado grueso Muestra SM-2 (Pegmatita)

Muestra SM-2(Pegmatita)						
Tamiz mm. (1)	Peso retenido gramo (2)	% retenido (3)	% retenido acumulado (4)	% pasa (5)	Límite superior	Límite inferior
25,4 mm.	0	0	0	100	100	100
19,0 mm.	1694	15,4	15,4	84,6	90	100
9,51 mm.	6061	55,1	70,5	29,5	20	55
4,76 mm.	1897	17,2	87,7	12,3	0	10
2,38 mm.	1348	12,3	100,0	0	0	5
Fondo	0	0,0	100,0	0		
Total	11000	100%				

Fuente: Autores

Figura 22. Grafica análisis granulométrico muestra SM2 (Pegmatita)



Fuente: Autores

Como puede observarse en las figuras 11 y 12 las curvas granulométricas se encuentran fuera de los límites de la norma, no cumpliendo en los tamices $\frac{3}{4}$ " (19 mm) y No 4 (2.36 mm) al presentar un exceso de finos y gruesos no permitiendo una uniformidad en cada material, es decir, no poseen una adecuada granulometría. Sin embargo esta propiedad puede ser controlada y modificada haciendo uso de tamices de $\frac{3}{2}$ ", No 5 y No6 como también la de realizar la subdivisión del agregado en fracciones que se manejan y dosifican individualmente en proporciones adecuadas para integrar la curva granulométrica en la grava total.

5.7. RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 92 (ASTM C-33)

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las muestras ensayadas según Norma Icontec 92 para determinar el peso unitario, ver tabla 24.

Tabla 24. Procedimiento para calcular Peso Unitario suelto y compactado del agregado de las muestra SM-1(anfibolita) y SM-2(Pegmatita), sombreado en azul.

Calibración del medidor	Peso SM-1	Peso SM-2	Unid
P1 = Peso del medidor + vidrio	3015	3015	G
P2 = Peso del medidor + vidrio + agua	5842	5842	G
V=Volumen del medidor $(P2-P1)/1000$	2,827	8,857	cdm3
DATOS			
Pm = Peso del medidor vacío	2527	2527	G
Pc =Peso del medidor + material S.S.S. compactado	7284	6961	G
Ps = Peso del medidor + material S.S.S. suelto	6863	6621	G
Peso unitario del agregado S.S.S. compactado $(Pc-Pm)/V$	1568,45	1682,70	kg/m3 E**
Peso unitario del agregado S.S.S. Suelto $(Ps-Pm)/V$	1448,18	1533,78	kg/m3

Fuente: Autores

El peso unitario suelto y compactado son características propias de cada material. Los valores obtenidos para SM-1 y SM-2 se encuentran comprendidos dentro del rango de agregados más comúnmente utilizados en el concreto estructural y no estructural que varían de 1300-1750 kg/m³, es decir, agregados de peso normal.

5.8. RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 176 (ASTM C-127)

En la Tabla 25 se observan los resultados obtenidos de las muestras ensayadas según norma Icontec 176 para determinar densidad o peso específico. En la Tabla 26 se presentan los porcentajes de absorción y de vacíos en agregados gruesos.

Tabla 25. Pesos específicos. La que se encuentra sombreada en azul es el peso a tener en cuenta en el diseño de mezcla.

Gravedades Especificas			
Datos	Peso SM-1 Anfib.	Peso SM-2 Pegm.	Und.
A= Peso de la muestra en condición S.S.S., en el aire	5000	5000	g
Pa= Peso de la canasta, sumergida en agua	1800	1800	g
Pb= Peso de la canasta + muestra S.S.S., sumergida en agua	5100	4919	g
B= Peso de la muestra en agua = Pb - Pa	3300	3119	g
C = Peso de la muestra secada en el horno	4968,4	4959,6	g
CALCULOS			
Gravedad especifica real..... C/(C-B)	2,98	2,69	
Gravedad especifica aparente..... C/(A-B)	2,92	2,64	
Gravedad especifica aparente S.S.S.....A/(A-B)	2,94	2,66	(D)**

Fuente: Autores

Tabla 26. Determinación de Porcentaje de absorción y vacíos

Calculo	% SM-1(Anfibolita)	% SM-2(Pegmatita)
% de absorción(A-C)*100/C	0,64	0,81
% de vacíos(D*1000-E)/(D*10)	81,74	81,17

Fuente: Autores

El peso específico para agregados gruesos según la norma, nos indica que los agregados naturales se encuentran entre 2.4 y 2.9 y es usado en ciertos cálculos para proporcionamiento de mezclas y control, por ejemplo en la determinación del volumen absoluto ocupado por el agregado. Generalmente no se le emplea como índice de calidad del agregado. Para las muestras analizadas se obtuvieron valores de 2,94 para agregados pétreos de anfíbolita y de 2,66 para agregados pétreos de pegmatita, encontrándose así dentro del rango permisible.

La norma ASTM C29 que se refiere al porcentaje de vacíos especifica que el agregado grueso debe encontrarse aproximadamente entre un 30% y un 45%. Las muestras indican que se exceden en el porcentaje estipulado, teniendo los agregados de la muestra SM-1(anfibolita) un porcentaje de vacíos de 81,74% y para los agregados de la muestra SM-2(pegmatita) un porcentaje de vacíos de 81,17%. Esto es debido a la angularidad de los agregados haciendo que la demanda de pasta (cemento y agua) sea mayor.

El agregado grueso generalmente tiene niveles de absorción (contenido de humedad a superficie seca saturada) que varían del 0.2% al 4%. Por lo que el porcentaje de absorción de las dos muestras de estudio se encuentran dentro del rango, teniendo 0,64 % para agregados de la muestra SM-1(anfibolita) y un 0,81% para agregados de la muestra SM-2(Pegmatita), una absorción menor al 1%. Determinar estas propiedades físicas propias de cada agregado pétreo son de suma importancia en la elaboración del diseño de mezcla para concretos.

5.9. RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 126

Como se observa en la tabla 27, las muestras presentan un porcentaje de afectación menor al 1% por ataques de sulfato magnesio, siendo para los agregados de la muestra SM-1 (anfíbolita) 0,33% de afectación y para agregados de la muestra SM-2(pegmatita) 0,01 % de afectación. Lo anterior indica que las muestras presentan resistencia alta al deterioro por acción de los agentes atmosféricos durante la vida útil de la obra, en que estos sean usados.

Tabla 27. Determinación de la Resistencia de los agregados pétreos al ataque por sulfato de magnesio.

Determinación de Sulfato de Magnesio		
Muestra	Anfíbolita	Pegmatita
Peso Inicial (g)	1500	1500
Peso Final (g)	1495	1499,9
Peso Inicial – Peso Final	5	0,1
% Afectado	0,33%	0,01%

Fuente: Autores

5.10. RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 127

Las muestras de agregados no presentan materia orgánica. Por lo tanto se concluye que las propiedades del concreto como la resistencia y durabilidad no se afectan pues no hay interferencia en las reacciones químicas de hidratación del cemento durante el proceso de fraguado.

5.11. RESULTADO DE LA NORMA ICONTEC 1776

Todo agregado pétreo presenta porosidad, la cual puede estar llena con agua. Estos poseen un grado de humedad, que es de gran importancia ya que se puede saber si nos aporta agua a la mezcla. Los Porcentajes de humedad de cada muestra de agregados observados en la tabla 28 son relativamente bajos, lo que quiere decir que los poros de los agregados estaban parcialmente secos. Se concluye que el agregado aporta una mínima cantidad de agua a la mezcla.

Tabla 28. Determinación del peso seco en ambiente y del peso seco el horno

Tipo de roca	Peso seco ambiente "W" (grs.)	Peso seco Horno "D" (grs.)
SM-1(Anfibolita)	2000,3	1994,8
SM-2(Pegmatita)	2000,1	1995,6
SM-1 (Anfibolita)		SM-2 (Pegmatita)
P = [(W-D)/D]		P = [(W-D)/D]
W = 2000,3 gr.		W = 2000,1 gr.
D = 1994,8 gr.		D = 1995,6 gr.
P = [(2000,3-1994,8)/1994,8] * 100		P = [(2000,1-1995,6)/1995,6] * 100
P = 0,28 % de Humedad		P = 0,28 % de Humedad

Fuente: Autores

5.12. RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 98 (ASTM C-131)

En la tabla 29 se observa los resultados obtenidos al ensayar las muestras según la norma Icontec 98.

Tabla 29. Determinación del porcentaje de desgaste en las muestras.

PRUEBAS	SM-1 Anfibolita	SM-2 Pegmatita
Gradación usada	B	B
No de esferas	11	11
No de revoluciones	1000	1000
PRUEBAS	SM-1 Anfibolita	SM-2 Pegmatita
Pa = Muestra seca antes del ensayo (g.)	5000	5000
Perdida de material (Pa - Pb.)	1489	1983
% Desgaste = $((Pa - Pb) / Pa) * 100$	29,78	39,66
Tiempo	15 min.	15 min.

Fuente: Autores

Al realizar el ensayo en la máquina de los Ángeles se obtuvo un desgaste del 29,78% para la muestra SM-1(anfibolita) y para la muestra SM-2(pegmatita) un desgaste de 39,66%. La norma establece que debe encontrarse entre 30% y 40% para concreto y para carreteras hasta un 50%, por lo tanto es un agregado que cumple lo especificado por la norma, pues cuenta con dureza y tenacidad apta para un concreto.

5.13. RESULTADOS DE LA NORMA ICONTEC 175 (ASTM C-289)

Los resultados de la prueba de determinación de sílice por el método Gravimétrico son: SM-1 85,3% y SM-2 96,2% como se observa en la tablas 30 y 31. De lo anterior nace la necesidad de culminar la segunda fase de la Norma Icontec 175. Al comparar estos resultados con los obtenidos en la descripción de secciones delgadas se observan minerales como Hornblenda, Plagioclasa, Cuarzo, ortoclasa, zoisita, clinozoisita y esfena los cuales se encuentran en el grupo de silicatos, que indica un alto porcentaje de sílice (SiO₂).

La presencia de feldespato alcalino (ortoclasa y albita) y de cuarzo microcristalino en porcentajes considerables en las muestras, además de evidenciarse deformación en los mismos, aportan la cantidad de sílice que reaccionaría con los álcalis del cemento. Teniendo en cuenta lo anterior se pueden indicar que son potencialmente reactivas.

Tabla 30. Resultado porcentaje de sílice en la muestra SM-2 (pegmatita)

ANALISIS FISICOQUIMICO		
Codificación de la muestra: 11-399-01	Tipo de muestra: Puntual	
Identificación de la muestra: Pegmatita		
Matriz de la muestra: Roca		
Muestreo realizado por : El cliente		
Lugar y punto de muestreo: Santa marta/ Mina Tritupisvar Ltda.		
Fecha de muestreo: No suministrado		
PARAMETRO	RESULTADO	METODO/NORMA
Sílice (%SiO ₂)	96,2	Gravimétrico

Fuente: Autores

Tabla 31. Resultado porcentaje de sílice en la muestra SM-1(Anfibolita)

ANALISIS FISICOQUIMICO		
Codificación de la muestra: 11-399-02	Tipo de muestra: Puntual	
Identificación de la muestra: Anfibolita		
Matriz de la muestra: Roca		
Muestreo realizado por : El cliente		
Lugar y punto de muestreo: Santa marta/ Mina Tritupisvar Ltda.		
Fecha de muestreo: No suministrado		
PARAMETRO	RESULTADO	METODO/NORMA
Sílice (%SiO ₂)	85,3	Gravimétrico

Fuente: Autores

5.14. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN

En la tabla 32 se tabulan los resultados del ensayo a la compresión, en la cual se detallan las resistencias alcanzadas de los cilindros de concreto a las edades respectivas para agregados gruesos de anfibolita. Dichas resistencias alcanzan un 77.5% a la edad de 7 días, un 79.3% a los 14 días y 88.7% de la resistencia a los 28 días.

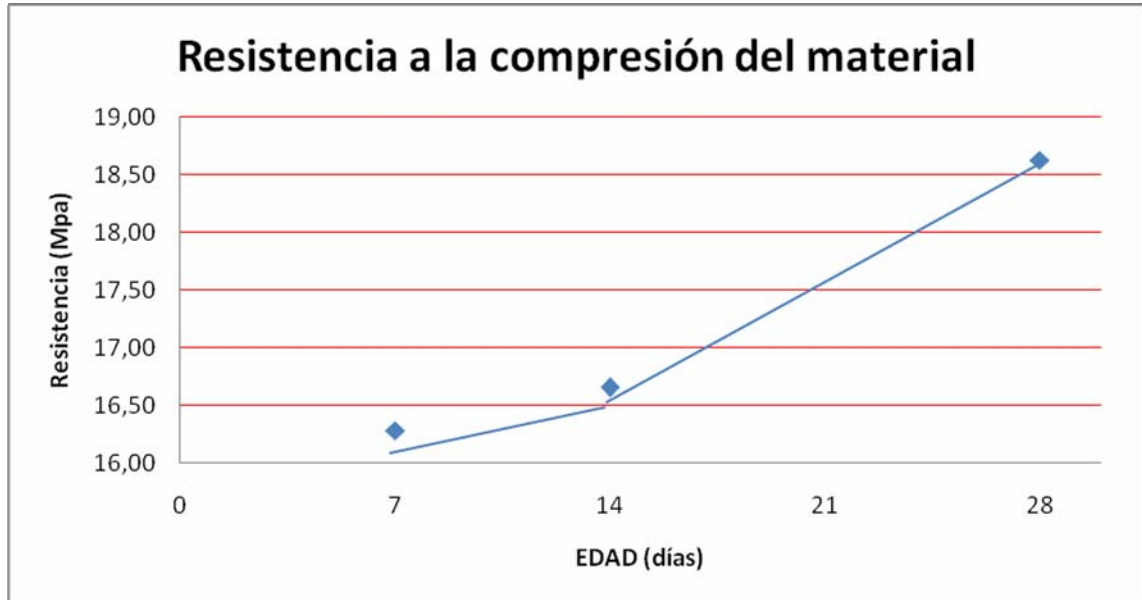
La resistencia a los 28 días es considerada casi como el máximo de tolerancia a compresión que puede soportar un elemento de concreto, sin embargo, como es sabido el concreto sigue adquiriendo resistencia a la compresión hasta los cien años. De lo anterior se observa que casi el 100% de la misma se presenta a los 28 días (Figura 23).

Tabla 32. Ensayo de compresión a la ruptura de muestra SM-1 (anfibolita) de concreto.

No	Fecha de Fundición	Fecha de Ruptura	E d a d	Resisten -cia Ultima	Esfuerzo	Ultimo	Promedio Esfuerzo
	aa/mm/dd	aa/mm/dd	D i a s	Kg	Mpa	P.S.I	Mpa
M1	2012-01-13	2012-01-20	7	13600	16,78	2396,52	16,28
M2	2012-01-13	2012-01-20		12800	15,79	2255,55	
M1	2012-01-13	2012-01-27	14	14000	17,27	2467,00	16,65
M2	2012-01-13	2012-01-27		13000	16,04	2290,79	
M1	2012-01-13	2012-02-02	28	15700	19,37	2766,57	18,63
M2	2012-01-13	2012-02-02		14500	17,89	2555,11	

Fuente: Autores

Figura 23. Resistencia a la compresión del material de agregado grueso de anfibolita, SM-1.



Fuente: Autores

En la tabla 33 se tabulan los resultados del ensayo a la compresión, en la cual se detallan las resistencias alcanzadas de los cilindros de concreto a las edades respectivas para agregados gruesos de anfibolita. Dichas resistencias alcanzan un 66.08% a la edad de 7 días, un 77.83% a los 14 días y 85.17% de la resistencia a los 28 días.

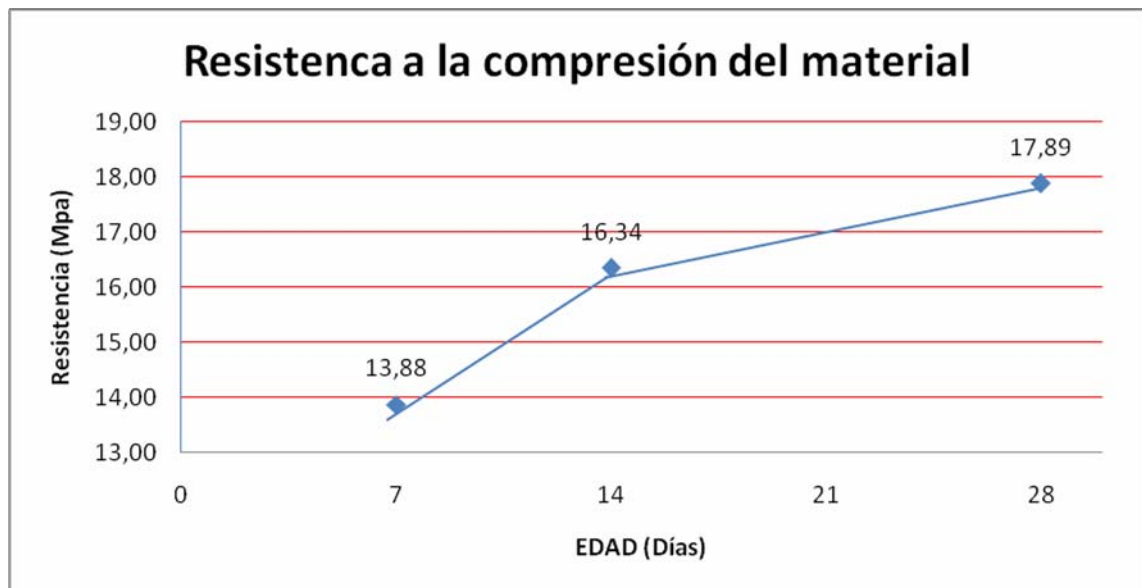
La resistencia a los 28 días es considerada casi como el máximo de tolerancia a compresión que puede soportar un elemento de concreto, sin embargo, como es sabido el concreto sigue adquiriendo resistencia a la compresión hasta los cien años. De lo anterior se observa que casi el 100% de la misma se presenta a los 28 días (Figura 24).

Tabla 33. Ensayo de compresión a la ruptura de muestra SM-2 (Pegmatita) de concreto.

No	Fecha de Fundición	Fecha de Ruptura	E d a d	Resist encia Ultima	Esfuerzo	Ultimo	Promedio Esfuerzo
	aa/mm/dd	aa/mm/dd	D i a s	Kg	Mpa	P.S.I	Mpa
M1	2012-01-13	2012-01-20	7	10000	12,34	1762,15	13,88
M2	2012-01-13	2012-01-20		12500	15,42	2202,68	
M1	2012-01-13	2012-01-27	14	12500	15,42	2202,68	16,34
M2	2012-01-13	2012-01-27		14000	17,27	2467,00	
M1	2012-01-13	2012-02-02	28	14000	17,27	2467,00	17,89
M2	2012-01-13	2012-02-02		15000	18,50	2643,22	

Fuente: Autores

Figura 24. Resistencia a la compresión del material de agregado grueso de Pegmatita, SM-2.



Fuente: Autores

En la tabla 34 se tabulan los resultados del ensayo a la compresión, en la cual se detallan las resistencias alcanzadas de los cilindros de concreto a las edades respectivas para agregados gruesos de anfibolita. Dichas resistencias alcanzan un 75.45% a la edad de 7 días, un 81.35% a los 14 días y 85.17% de la resistencia a los 28 días.

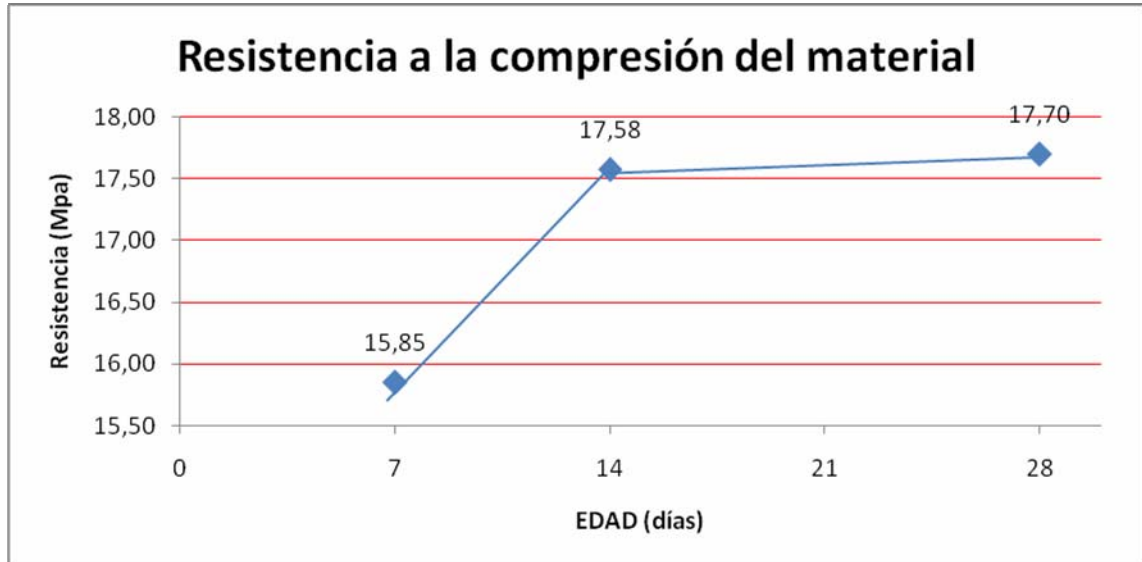
La resistencia a los 28 días es considerada casi como el máximo de tolerancia a la compresión que puede soportar un elemento de concreto, sin embargo, como es sabido el concreto sigue adquiriendo resistencia a la compresión hasta los cien años. De lo anterior se observa que casi el 100% de la misma se presenta a los 28 días (Figura 25).

Tabla 34. Ensayo de compresión a la ruptura de muestra Mixta de concreto.

No	Fecha de Fundición	Fecha de Ruptura	E d a d	Resist encia Ultima	Esfuerzo	Ultimo	Promedio Esfuerzo
	aa/mm/dd	aa/mm/dd	D i a s	Kg	Mpa	P.S.I	Mpa
M1	2012-01-13	2012-01-20	7	12400	15,30	2185,06	15,85
M2	2012-01-13	2012-01-20		13300	16,41	2343,65	
M1	2012-01-13	2012-01-27	14	13500	16,65	2378,90	17,58
M2	2012-01-13	2012-01-27		14200	18,50	2502,22	
M1	2012-01-13	2012-02-02	28	14600	17,89	2572,73	17,70
M2	2012-01-13	2012-02-02		14200	17,52	2555,11	

Fuente: Autores

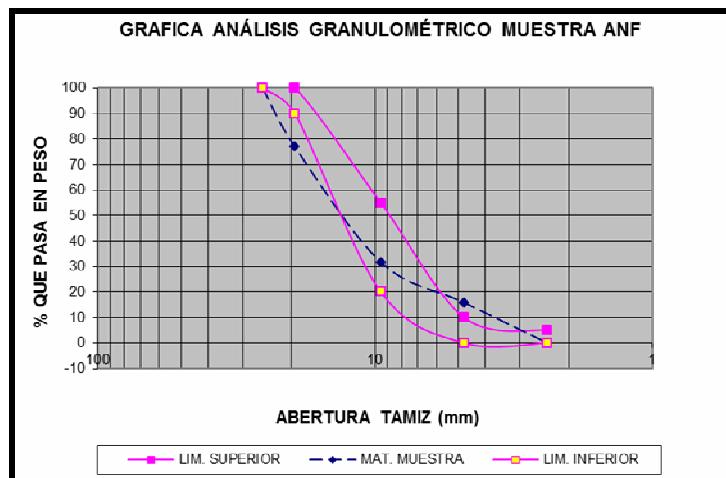
Figura 25. Resistencia a la compresión del material de agregado grueso de la mezcla de anfíbol y pegmatita.



Fuente: Autores

5.15 RESUMEN DE LOS ENSAYOS APLICADOS A LAS MUESTRAS

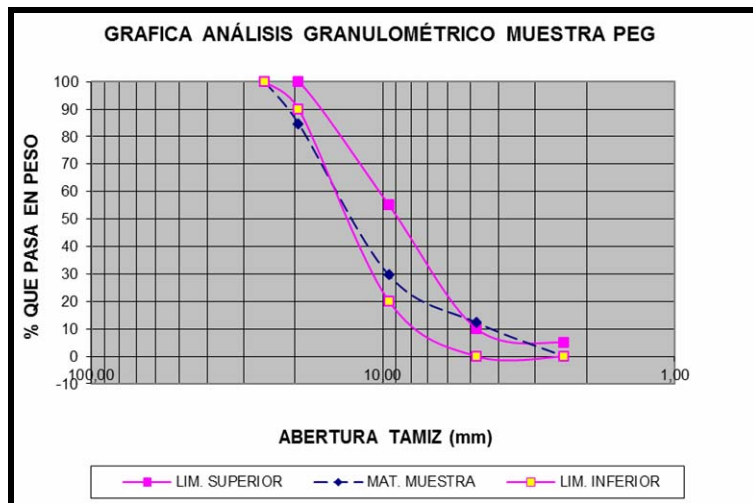
- Muestra SM-1 (Anfibolita)



Tamiz No	25,4 mm	19,0 mm	9,51 mm	4'76 mm	2,38 mm
% Que pasa	100	76,9	31,7	15,9	0

CARACTERISTICAS FISICAS	
Peso especifico	2,9
Peso Unitario	1568,45
Porcentaje de Vacíos	81,74
Porcentaje de Absorción	0,64
Contenido de Materia Orgánica	INOCUO
Humedad	0,28
% Desgaste por Sulfato de Magnesio	0,33
CARATERISTICAS MECANICAS	
% Desgaste por Abrasión	29,78
CARCTERISTICAS QUIMICAS	
% Sílice	96,2

- Muestra SM-1 (Pegmatita)



Tamiz No	25,4 mm	19,0 mm	9,51 mm	4'76 mm	2,38 mm
% Que pasa	100	84,6	29,5	12,3	0

CARACTERISTICAS FISICAS	
Peso especifico	2,6
Peso Unitario	1682,70
Porcentaje de Vacíos	81,17
Porcentaje de Absorción	0,81
% Desgaste por Sulfato de Magnesio	0,01
Contenido de Materia Orgánica	INOCUO
Humedad	0,28
CARATERISTICAS MECANICAS	
% Desgaste por Abrasión	29,78
CARCTERISTICAS QUIMICAS	
% Sílice	85,3

6. CONCLUSIONES

- El análisis Petrográfico permitió clasificar y determinar la composición mineralógica de los agregados pétreos. Para la muestra SM-1 se clasifica como roca metamórfica conocida como Anfibolita de textura Granonematoblástica y estructura bandeada compuesta de minerales principales de hornblenda y plagioclasa con minerales secundarios de cuarzo, zoisita y esfena. Para la muestra SM-2 se clasifica como roca ígnea conocida como micropegmatita hipoabisal, holocristalina de textura Fanéritica, alotrimórfica-inequigranular, de estructura masiva compuesta de por minerales principales de plagioclasa y cuarzo, con minerales secundarios de ortoclasa, hornblenda y clinzoisita. La presencia de cuarzo en ambas muestras y de minerales silicatados feldespáticos y ferromagnesianos que tienen en su composición sílice observados en las secciones delgadas, permite inferir que posiblemente puedan reaccionar con los álcalis del cemento.
- El estudio de la reactividad potencial álcali-sílice en los agregados, es un parámetro crítico en cuanto a la durabilidad del concreto, ya que la expansión y posible agrietamiento provocado por esta reacción, repercute en el debilitamiento estructural y acorta la vida útil de las estructuras a base de concreto. El análisis del porcentaje de sílice por el método gravimétrico revela que la muestra SM-1 contiene un porcentaje en sílice de 85,3% y para la muestra SM-2 contiene un porcentaje en sílice de 96,2%. Son muestras que en su composición excede más del 50% en sílice existiendo la probabilidad de que ocurra una reacción con los álcalis contenidos en el cemento.

- En relación a las propiedades físicas que presentan las muestras analizadas SM-1 y SM-2 de acuerdo al análisis granulométrico presentan partículas gruesas y finas en exceso, sin embargo, se encuentra cerca de los límites establecidos por la norma, debiéndose realizar un mejor tamizado, haciendo uso del tamiz 3/2", el tamiz No5 y el tamiz No6. El contenido de materia orgánica en los resultados indican que para SM-1 y SM-2 son inocuos permitiendo tener un concreto resistente y durable al no existir impurezas en las reacciones químicas de hidratación del cemento durante el proceso de fraguado.
- Los niveles de absorción para la muestra SM-1 es de 0,64% y para SM-2 es de 0,81%, por lo tanto se encuentran dentro del rango permisible de 0.2% a 4%. En cuanto al porcentaje de vacíos para SM-1 es de 81,74% y para SM-2 es de 81,17%, los cuales están por fuera del rango permisible de 30% a 45%, generando resultados desfavorables de resistencia a la compresión en el concreto. Al determinar el desgaste en las muestras por ataque de sulfato de magnesio indican que son geomateriales muy resistentes a los agentes atmosféricos, al presentar un porcentaje menor al 1% del límite de 15% establecido en la norma.
- Los Porcentajes de humedad para las muestras de agregados pétreos SM-1 y SM-2 son muy bajos inferior al 1%, debido a que los poros de los agregados estaban parcialmente secos, lo que indica que dichos agregados aportan una mínima cantidad de agua en el diseño de mezcla de concreto. El peso unitario de un agregado indica la calidad de este y su aptitud para ser utilizado en la fabricación de concreto. El ensayo arrojó valores para la muestra SM-1 de 1568,45 Kg/m³ y para la muestra SM-2 de 1682,70Kg/m³. Según lo observado en la tabla 4(Clasificación del agregado según su densidad), los agregados en estudio se podrían utilizar para la realización de concreto estructural y no estructural de peso normal.

- La gravedad específica que más interesa en la tecnología del concreto y específicamente en el diseño de mezclas es la densidad aparente porque con ella se determina la cantidad de agregado requerido para un volumen unitario de concreto, debido a que los poros interiores de las partículas de agregado van a ocupar un volumen dentro de la masa de concreto y además porque el agua se aloja dentro de los poros saturables. La muestra SM-1 presenta una gravedad específica de 2,94 y para la muestra Sm-2 una gravedad específica de 2,66 que se encuentran dentro del intervalo establecido en la norma.
- La resistencia a la abrasiones una propiedad que depende principalmente de las características de la roca madre. Para los materiales ensayados por este método, la muestra SM-1 presentó un desgaste de 29,78% y la muestra SM-2 un desgaste de 39,66%, lo que indica que se encuentran dentro del límite establecido en la norma, por lo tanto dichos agregados son aptos para el diseño de la mezcla de concreto, ya que nos podría garantizar buenos resultados al ser utilizados debido a la dureza y tenacidad que presentan.
- El diseño de mezcla de las muestras SM-1, SM-2 y la combinación de ellas en cilindros de concreto, no cumplieron con la resistencia especificada. Este resultado puede deberse a una excesiva cantidad de aire incorporado, el cual afecta la resistencia nominal del diseño de mezcla. Para su corrección se necesita mejorar la granulometría de los agregados, mezclando partículas de otros tamaños a fin de reducir el porcentaje de vacíos del agregado grueso. Así se reduce así la pasta arena-cemento, y se obtiene un concreto homogéneo y de buenas proporciones. El porcentaje del nuevo tamaño de agregado a utilizar, debe ser no mayor del 40% de la proporción del agregado grueso, del diseño de mezcla que se desea corregir.
- Las características físicas y mecánicas de los agregados pétreos influyen directamente en las propiedades del concreto, por lo que no es adecuado

considerarlos como componentes inertes de la mezcla. Las muestras Sm-1 y SM-2 provenientes de la cantera Tritupisvar. objetos de este estudio cuentan en general con características físicas, mecánicas favorables para su utilización en mezclas de concreto estructural y no estructural.

- En relación al comportamiento de sus características mineralógicas y químicas, revelan que dichos geomateriales posiblemente reaccionarán con los álcalis del cemento, debido a la mineralogía observada en sección delgada de minerales Hornblenda, plagioclasa, cuarzo, ortoclasa, zoisita, clinozoisita y esfena, que al comparar con la prueba de determinación de sílice mediante el método Gravimétrico presentan una composición química mayor del 80% en SiO₂, haciendo que su uso sea condicionando bajo parámetros de la norma ACI -201.2R-01.
- Cuando no se tiene conocimiento previo del comportamiento activo del agregado, se hace necesario la interdisciplinariedad utilizando áreas de conocimiento de otras ciencias, como es el caso de la petrografía que es una rama de la geología dedicado a la descripción científica y clasificación sistemática de rocas. La petrografía aplicada a la tecnología del concreto permite determinar si hay componentes que puedan afectar el comportamiento de un agregado en una aplicación específica, es decir, nos da resultados de orientación para así poder recomendar ensayos que confirmen o no si hay componentes dañinos.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la aplicación completa de la Norma Icontec 175 o ASTM C289 para conocer si las muestras SM-1 y SM-2 presentan reacción con los álcalis del cemento portland.
- Si las muestras son reactivas, no se deberían utilizar si el hormigón ha de estar expuesto al agua de mar u otros ambientes en los cuales hay álcalis disponibles de fuentes externas que pudieran ingresar al hormigón en forma de solución.
- Si no hay presencia de álcalis de fuentes externas se pueden utilizar agregados reactivos siempre que se apliquen las siguientes precauciones:
 - a. Especificar un cemento con bajo contenido de álcalis (máximo 0,60% expresado como Na_2O equivalente). Prohibir el uso de agua marina o agua proveniente de suelos alcalinos como agua de mezclado, y evitar la adición de cloruro de sodio o potasio. Tener en cuenta el riesgo de migración de los álcalis debido a la difusión en el hormigón.
 - b. Alternativamente, utilizar un material puzolánico adecuado que satisfaga los requisitos aplicables de la norma ASTM C 618, o escoria de alto horno que satisfaga los requisitos de la norma ASTM C 989. Las puzolanas se deben ensayar de acuerdo con la norma ASTM C 441 para determinar su efectividad para prevenir expansiones excesivas debidas a la reacción álcali-agregado.
- Otro método que permite determinar el comportamiento del agregado es el que ha sido normalizado por la ASTM en la especificación C-227, determina la potencial reactividad alcalina de la combinación de cemento y agregado. La

dificultad de este procedimiento está en que requiere un largo proceso, no menor de 6 meses.

BIBLIOGRAFIA

- ALVARADO N., (2010). Influencia de la morfología de pétreos: volcánicos, triturados y cantos rodados; correlacionando matemáticamente los módulos de elasticidad estático y dinámico en cilindros de concreto de 10 cm. X 20 cm. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.
- ALAEJOS P., BERMÚDEZ A., (2003). Durabilidad y procesos de degradación del hormigón de presas. Estudio Bibliográfico. Monografía M-76. *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas*. Madrid.
- ASTM Book of Standards. Standard Specification for Concrete Aggregates. USA: ASTM Vol. 04.02 2002.
- CASTRO A., (1989) Petrografía básica: Texturas, clasificación y nomenclatura de rocas. 1. ed. Madrid, España. Editorial Paraninfo, S.A.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, (CIOH) 2010, Climatología de Los Principales Puertos Del Caribe Colombiano, Santa Marta.
- CHAN J., CARCAÑO R., MORENO E. (2003) “Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto” Revista Ingeniería 7-2, Argentina, 2003, pp. 39-46.
- DELGADO D., GARNICA P., VILLATORO G., RODRÍGUEZ O., (2006). Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de las mezcla

asfáltica. Secretaría de comunicaciones y transportes. Instituto Mexicano del Transporte.

- FLORIÁN E., (2008). Análisis mineralógico y examen petrográfico de dos bancos de materiales del municipio de Asunción mita, Jutiapa. Trabajo de Graduación Ing. Civil, Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.
- GAITAN S., (2007). Análisis mineralógico y examen petrográfico del agregado fino para concreto de tres bancos de la región central del país. Trabajo de Graduación Ing. Civil, Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.
- García, C., (2007). Manual de Prácticas de Petrología Metamórfica. Bucaramanga, Colombia. Ediciones UIS.
- GONZALES M., (1991).Ataque químico al concreto. Exposición en el ciclo organizado por el ACI, Capítulo Peruano sobre Corrosión en Estructuras de Concreto
- ICONTEC., (2001). Instituto Colombiano de Normas Técnica, NTC 2017 “Adoquines” Instituto del Concreto, Asocreto Construcción de Pavimentos”, Asocreto, Bogotá, Colombia.
- INSTITUTO DEL CONCRETO., (1997). Manual Tecnología y propiedades. Asociación colombiana de productores de concreto. ASOCRETO, tercera reimpresión Colombia.

- KERR P., (1965). Mineralogía óptica. 3. ed. Ed. Madrid, España. Ediciones del Castillo. 449p.
- LANDAVERDE J., (2011). Estudio de los Agregados para Concreto en las Canteras más Importantes de El Salvador.
- LEÓN M., RAMÍREZ F., (2009). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes.
- LUNA J Y SALGUERO R., (2004). Estudio de Calidad de agregados para concreto aplicando las normas ASTM C-33, C-131, C-295 y C-289 (Presentación de Casos). Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de estudios Superiores de Energía y Minas.
- MACKENZIE W.S., DONALDSON C.H., (1982) Atlas of igneous rocks and their textures. 1. ed. Edinburgh, England. Pearson education limited.
- MANTILLA L., (2003) Guía de laboratorio de petrología ígnea. 1. ed. Bucaramanga, Colombia. Ediciones UIS.
- MAYA M., (2006). Zonas Potenciales para Agregados Naturales en los alrededores de Medellín, En: Boletín Geológico y Minero. Servicio Geológico INGEOMINAS. Bogotá. Vol. 117, No.4, p. 703-714.
- MARTÍN A., GADEA J., CAMPOSL., CALDERÓN V., GARCÍA M., y CALLEJA A, RODRÍGUEZ A., (2010). Evaluación de la reactividad árido-álcali en diversos áridos silicatados. Alternativas para minimizar esta reacción.

- MEJÍA P., SANTA M., ORDÓÑEZ O., PIMENTEL M., (2008). Consideraciones petrográficas, geoquímicas y geocronológicas de la parte Occidental del Batolito de Santa Marta, Dyna, vol. 75, núm. 155, julio, 2008, pp. 223-236, Universidad nacional de Colombia.
- MEHTA K., (1986). Concrete: Structure, Properties and Materials. Prentice Hall.
- MENDOZA E., (2003). Durabilidad de concretos estructurales. Academia de Ingeniería. México.
- MIER R., (1990) Manual de laboratorio de mineralogía óptica. 1. ed. Bucaramanga, Colombia. Ediciones UIS.
- MORATAYA C., (2005). Concreto de alta resistencia (experimentación en Guatemala). Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.
- NORMA ICONTEC 129., (1995). Agregados pétreos; extracción y preparación de muestra.
- NORMA ICONTEC 92., (1995). Método para determinar la masa unitaria de los agregados
- NORMA ICONTEC 77., (1994). Tamizado de materiales granulados
- NORMA ICONTEC 98., (1998). Método de ensayo para determinar de la resistencia al desgaste de los agregados gruesos hasta de 37,5 mm, utilizando la máquina de los ángeles.

- NORMA ICONTEC 126., (1995). Método para determinar la resistencia de los agregados a los ataques con sulfato de sodio o sulfato de magnesio.
- NORMA ICONTEC 175., (1996). Método químico para determinar la reactividad potencial a agregados.
- NORMA ICONTEC 176., (1995). Método de ensayo para determinar la densidad y absorción de agregados gruesos.
- OSORIO D., (2009). Estudios comparativos del análisis físico, mecánico, Químico, y petrográfico del agregado fino natural (del río Villalobos) y del agregado fino de trituración (de la roca Zona 18) en morteros de mampostería de acuerdo a la norma ASTM C-270 “*standards pecification formortar forunit Masonry*” (especificación estándar para morteros de Mampostería. Trabajo de Graduación Ing. Civil, Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.
- Palbol L., (1996). Optimización de los agregados para concreto. "Construcción y tecnología," (México), 9 (100).
- RAMÍREZ I., (2008). Sostenibilidad de la Explotación de Materiales de Construcción en el Valle de Aburrá. Trabajo de Grado Maestría Medio Ambiente y Desarrollo. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.
- RÍOS C. Y CASTELLANOS O., (2005). Atlas de minerales vistos bajo el microscopio de luz transmitida. 1. ed. Bucaramanga, Colombia. Ediciones UIS.

- SÁNCHEZ D., (2006). "Tecnología del Concreto" 4da Edición. Bhandar Editores, Bogotá, Colombia
- STANTON T., (1948). Correlation of laboratory tests with field experiences of excessive concrete expansion induced by a reaction between the cement and aggregate. Proceedings American Society for Testing and Materials, 48: 1057-1066
- SEGARRA J., (2011). Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria de la Construcció.
- SHETTY, (2005).concrete technology, S. Chand & Company Ltd. New Delhi.
- SOTO R., (2008). Evaluación y análisis de mezcla de concreto, elaboradas con agregados de origen pétreo (Canto rodado y trituración) y escoria de acería. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.
- URIBE W., (1991) El control de calidad en los agregados para concreto 3ª parte. En: Construcción y tecnología. México., Vol. 40. No 26 p.34