



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

STUDY OF THE PROPERTIES AND QUALITY OF THE PÉTREOS MATERIALS FOR PRODUCTION OF STRUCTURAL CONCRETE, EXTRACTED FROM THE MEDIA BASIN OF THE RIO CHINCHINÁ

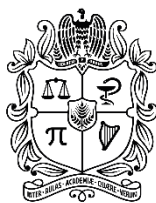
Omar Bernal Orozco

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Universidad Nacional de Colombia

Manizales, Colombia

2017



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES Y CALIDAD DE LOS MATERIALES PÉTREOS PARA PRODUCCIÓN DE CONCRETO ESTRUCTURAL, EXTRAÍDOS DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO CHINCHINÁ

Omar Bernal Orozco

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil
Universidad Nacional de Colombia
Manizales, Colombia

2017

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES Y CALIDAD DE LOS MATERIALES PÉTREOS PARA PRODUCCIÓN DE CONCRETO ESTRUCTURAL, EXTRAÍDOS DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO CHINCHINÁ

Omar Bernal Orozco

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Construcción

Director (a):

Ing. Civil, Esp. Tecnología de la Construcción, MSc Construcción,
MSc Tecnología de la Construcción, Ricardo Augusto Tolosa Correa

Línea de Investigación:

Nombrar la línea de investigación en la que se enmarca la tesis o trabajo de investigación

Grupo de Investigación:

Nombrar el grupo en caso que sea posible

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de arquitectura e ingeniería, Departamento de ingeniería civil

Manizales, Colombia

2017

(Dedicatoria o lema)

Su uso es opcional y cada autor podrá determinar la distribución del texto en la página, se sugiere esta presentación. En ella el autor del trabajo dedica su trabajo en forma especial a personas y/o entidades.

Por ejemplo:

A mis padres


o


La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico. Nunca olvides ésto entre tus diagramas y ecuaciones.

Albert Einstein

Agradecimientos

Esta sección es opcional, en ella el autor agradece a las personas o instituciones que colaboraron en la realización del trabajo. Si se incluye esta sección, deben aparecer los nombres completos, los cargos y su aporte al trabajo.

A continuación, se presenta la tabla de contenido la cual se actualiza automáticamente. Para los textos editados en Microsoft Word se debe hacer *click* en el botón derecho del mouse sobre la tabla de contenido y aparecerá el icono Actualizar Campos () , luego aparecerá una ventana en la cual debe seleccionar la opción Actualizar toda la tabla.

Tenga en cuenta al iniciar el diligenciamiento de la plantilla usar la opción del icono Mostrar Todo () Por medio de esta función podrá observar las secciones en que se encuentra construida esta plantilla, es muy importante conservar dichas secciones evitando borrar los saltos de sección. En caso de requerir más instrucciones sobre este tema por favor dirigirse al encargado de la Biblioteca Digital en cada una de las Sedes.

Resumen

El concreto a través del siglo XX se convirtió en el material de construcción más ampliamente utilizado en todo el mundo, ésto debido a la versatilidad tanto para dejarse moldear con facilidad como para su uso estructural, impulsando un desarrollo ingenieril más amplio al mejorar la calidad de estos materiales. Mediante el estudio de las características y propiedades del concreto se determinan los diseños de mezcla adecuados para la preparación de éstos, en relación con los componentes fundamentales: los agregados y la relación agua/material cementantes. Las características del concreto dependen, tanto en estado plástico como en estado endurecido, de las características y propiedades de los agregados gruesos ya que éstos constituyen entre un 70% a 80% de la mezcla del concreto, los cuales se deben estudiar para obtener concretos competitivos en calidad y costo. El presente trabajo tuvo el objetivo de caracterizar y analizar los agregados pétreos que arrastra el Río Chinchiná (Caldas), en la parte media de su cuenca con el fin de evaluar su aporte en el comportamiento mecánico para la producción de concretos estructurales.

Palabras clave: Caracterización física, Petrografía, Desempeño mecánico, Agregados pétreos, Río Chinchiná, Concreto estructural, Reacción álcali-áridos.

Abstract

Concrete through the twentieth century became the most widely used construction material in the world, due to the versatility both to be easily molded and to its structural use, impelling a wider engineering development by improving the quality of these materials. By means of the study of the characteristics and properties of the concrete, the suitable mix designs are determined for the preparation of these, in relation to the fundamental components: the aggregates and the water / cement ratio. The characteristics of the concrete depend on both the plastic and the hardened state of the properties and properties of the aggregates, since they constitute between 70% and 80% of the concrete mixture, which must be studied in order to obtain competitive concrete in Quality and cost. The present work had the objective of characterizing and analyzing the stone aggregates that drag the Chinchiná River (Caldas), in the middle part of its basin in order to evaluate its contribution in the mechanical behavior for the production of structural concrete.

Keywords: Structural concrete, Stone aggregates, Chinchiná River, Petrography, Alkali-aggregate reaction, mechanical behavior.

Contenido

	Pág.
Resumen	I
Lista de figuras	II
Lista de tablas	III
Lista de Símbolos y abreviaturas	IV
Introducción	V
Justificación	VI
Objetivos	VII
1. Estado del Arte	1
1.1 Concreto	1
1.1.1 Características del concreto.....	2
1.1.2 Limitaciones del concreto.....	3
1.1.3 Factores que influncian en las propiedades del concreto	3
1.1.3.1 Relación Agua/Cemento (W/CM)	4
1.1.3.2 Proceso de curado	4
1.1.4 Tipos de concretos	5
1.1.4.1 Concretos según su resistencia a compresión.....	5
1.1.5 Componentes del concreto	7
1.1.5.1 Cemento	7
1.1.5.2 Normas técnicas para los cementos.....	9
1.1.5.3 Agua	9
1.1.5.4 Agregados	10
1.2 Agregados	11
1.2.1 Clasificación de los agregados	11

1.2.2	Especificaciones de los Agregados para Concreto NTC 174 [53]	12
1.2.2.1	Agregado grueso	13
1.2.3	Test para agregados	13
1.2.4	Forma y textura de los agregados	16
1.2.5	Adhesión del agregado	18
1.2.6	Fuerza del agregado	18
1.2.7	Otras propiedades mecánicas del agregado	19
1.2.7.1	Desgaste de los agregados en la Máquina de los Ángeles	20
1.2.8	Gravedad específica	21
1.2.9	Densidad Bulk	21
1.2.10	Porosidad y absorción del agregado	21
1.2.11	Sustancias nocivas del agregado	22
1.2.11.1	Impurezas orgánicas	22
1.2.12	Agregados triturados de origen volcánico	22
1.3	Río Chinchiná	22
1.3.1	Geología del sector	23
1.3.2	Aproximación a la definición de rocas según su clasificación en la construcción	30
1.3.3	Clasificación de las rocas	31
1.3.3.1	Rocas ígneas	31
1.3.3.2	Rocas sedimentarias	32
1.3.3.3	Rocas metamórficas	32
1.4	Calidad del Concreto	32
1.4.1	Causas de durabilidades insuficientes	33
1.4.1.1	Permeabilidad	34
1.4.1.2	Absorción	36
1.4.2	Ataques ácidos	36
1.4.2.1	Sulfatación del concreto	38
1.5	Reacción álcali-agregado	39
1.5.1	Potencial reactividad álcali-sílice	39
1.5.1.1	Mecanismos de expansión	41
1.5.1.2	Reactividad de los agregados del concreto	42
2.	Aclaraciones	44
3.	Materiales y métodos	45
3.1	Evaluar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los agregados triturados extraídos de la zona media del río Chinchiná	45
3.1.1	Obtención de los agregados	45
3.1.1.1	Recolección de material	45
3.1.1.2	Trituración del material	49
3.1.2	Clasificación de los agregados	49
3.1.2.1	Clasificación por contraste	49
3.1.2.2	Clasificación por secciones delgadas	50
3.1.3	Caracterización mineralógica de los agregados	51
3.1.3.1	Microscopía de polarización	51
3.1.3.2	Difractometría de rayos X (XRD)	51
3.1.4	Caracterización física de los agregados	52
3.1.5	Caracterización mecánica de los agregados	52
3.1.5.1	Granulometría de los agregados	52

3.1.5.2	Resistencia al desgaste de los agregados	52
3.1.5.3	Resistencia a compresión de los agregados.....	52
3.1.6	Caracterización química de los agregados.....	53
3.2	Evaluar mediante pruebas mecánicas el aporte de los agregados seleccionados en la producción de concreto estructural.....	53
3.2.1	Diseño de mezcla	53
3.2.2	Resistencia a compresión de cilindros de concreto	54
4.	Resultados y discusión	55
4.1	Evaluar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los agregados triturados extraídos de la zona media del río Chinchiná	55
4.1.1	Clasificación de los agregados	55
4.1.1.1	Clasificación por contraste.....	55
4.1.1.2	Clasificación por secciones delgadas.....	57
4.1.2	Caracterización mineralógica de los agregados.....	58
4.1.2.1	Microscopía de polarización	58
4.1.2.2	Difracción de rayos X.....	69
4.1.3	Caracterización física de los agregados	75
4.1.3.1	Caracterización morfológica	75
4.1.3.2	Peso específico y absorción	77
4.1.3.3	Granulometría	79
4.1.4	Caracterización mecánica de los agregados.....	82
4.1.4.1	Resistencia al desgaste	82
4.1.4.2	Resistencia a compresión.....	85
4.1.5	Caracterización química de los agregados.....	86
4.1.5.1	Reacción Álcali-agregados	87
4.2	Evaluar mediante pruebas mecánicas el aporte de los agregados seleccionados en la producción de concreto estructural.....	92
4.2.1	Resistencia a compresión de cilindros de concretos.....	93
4.2.1.1	Desarrollo de la resistencia a compresión de cilindros de concretos por rocas 94	
4.2.1.2	Cambio en la resistencia a compresión de cilindros de concretos por relación W/CM.....	98
5.	Conclusiones y recomendaciones	101
5.1	Conclusiones.....	101

Lista de Figuras

Figura 1-1: Localización zona de estudio.....	24
Figura 1-2: Mapa geológico de la cuenca del río Chinchiná 1:50.000 (Tomado de SGC e IGAC).....	28
Figura 1-3: Cartografía básica cuenca del río Chinchiná 1:50.000 (Tomado del IGAC)..	29
Figura 3-1: Muestra de rocas naturales.	46
Figura 3-2: Clasificación macroscópica de rocas.	47
Figura 3-3: Montículos de triturado de rocas.	47
Figura 4-1: Clasificación de tipos de rocas por volumen.	56
Figura 4-2: a.) Sección delgada de la muestra 5 y b.) Composición mineralógica para la muestra 5, ambas para el pórfido andesítico.	59
Figura 4-3: a.) Sección delgada de la muestra 8 y b.) Composición mineralógica para la muestra 8, ambas para el pórfido andesítico.	59
Figura 4-4: a.) Sección delgada de la muestra 20, b.) Sección delgada de la muestra 11 y c.) Composición mineralógica para la muestra 20 y 11, ambas para el pórfido dacítico.	61
Figura 4-5: a.) Sección delgada de la muestra 9 y b.) Composición mineralógica para la muestra 9.	62
Figura 4-6: a.) Sección delgada de la muestra 3 y b.) Composición mineralógica para la muestra 3.	63
Figura 4-7: a.) Sección delgada de la muestra 7 y b.) Composición mineralógica para la muestra 7.	64
Figura 4-8: a.) Sección delgada de la muestra A2 y b.) Composición mineralógica para la muestra A2.....	65
Figura 4-9: a.) Sección delgada de la muestra 18 y b.) Composición mineralógica para la muestra 18.	66
Figura 4-10: a.) Sección delgada de la muestra 0 y b.) Composición mineralógica para la muestra 0.	67
Figura 4-11: a.) Sección delgada de la muestra A15 con objetivo 4x, b.) Sección delgada de la muestra A15 con objetivo 10x y c.) Composición mineralógica para la muestra A15.	68
Figura 4-12: a.) Sección delgada de la muestra A1 y c.) Composición mineralógica para la muestra A0 y A1.....	69
Figura 4-13: Difractograma para las metabasitas.	70
Figura 4-14: Difractograma para las granodioritas.....	71
Figura 4-15: Difractograma para el pórfido andesítico.	72
Figura 4-16: Difractograma para los basaltos.	73
Figura 4-17: Difractograma para los pórfidos dacíticos.	74
Figura 4-18: Clasificación de tipos de rocas.	75
Figura 4-19: Peso específico y absorción de los materiales extraídos del río Chinchiná y triturados.	78
Figura 4-20: Curvas de gradación para las rocas analizadas.	80
Figura 4-21: Dureza global de la roca hallada por medio de XRD y petrografía.	83

Figura 4-22: Porcentaje de desgaste por la máquina de Los Ángeles.....	84
Figura 4-23: Resistencia a compresión de cilindros (MPa).	85
Figura 4-24: Solidez frente a los sulfatos (%).	86
Figura 4-25: Composición porcentual de minerales en el grupo de rocas Andesíticas del complejo Nevado del Ruíz [144].....	88
Figura 4-26: Descripción de elementos mayores en la superficie de la tierra que generan compuestos de rocas principales bajo presiones y temperaturas variables [145].	89
Figura 4-27: Valores químicos de rocas ígneas representativas [145].	90
Figura 4-28: Composición química, óxidos mayores de la granodiorita [146].	90
Figura 4-29: Composición química, óxidos mayores, en rocas del Gabro de Cerro Frontino [147].....	91
Figura 4-30: Evolución de la resistencia a compresión.	95
Figura 4-31: Porcentaje del desarrollo de la resistencia a compresión.....	98
Figura 5-1: Rocas con reactividad álcali-sílice [150].....	103

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Clasificación de los tipos de cementos Portland [15, 35].	8
Tabla 1-2: Clasificación de agregados grueso según tamaño de tamiz [53].	14
Tabla 1-3: Promedio de los valores de prueba para las rocas británicas de diferentes grupos [56, 64].	20
Tabla 1-4: Lista de algunos compuestos causantes del ataque químico al concreto [95].	37
Tabla 3-1: Coordenadas del título de concesión minera 606-17.	48
Tabla 3-2: Coordenadas del título de concesión minera 795-17.	48
Tabla 4-1: Porcentaje de rocas en el conteo del triturado.....	56
Tabla 4-2: Clasificación de las rocas según análisis petrográficos.....	57
Tabla 4-4: Materiales implementados en el diseño de mezcla.	93
Tabla 4-5: Promedio de resistencias obtenidas a los 28 días por tipo de roca.	93

Introducción

Como Ingeniero civil y después de aproximadamente 20 años de trabajo en la vida profesional en el sector de extracción, transporte, transformación, beneficio, comercialización de materiales pétreos provenientes de la cuenca del río Chinchiná se ha ido aprendiendo de una manera empírica algunos aspectos no solo de la forma como se debe explotar el río para mantener reservas, ser amables con el medio ambiente, tener mayor producción, sino también tener más calidad en la producción de los materiales, es por ello que puede hablar que las épocas de verano son mejores para extraer el material porque este puede ser escogido, las máquinas pueden entrar de una manera más libre y segura al lecho y ejecutar un trabajo de extracción protegiendo las riveras, el material vegetal, y la fauna; También se puede determinar que el río Chinchiná en las crecientes menores y medianas solo arrastra arenas y material pequeño y que en las grandes crecientes es cuando arrastra los materiales medianos que son susceptibles a ser triturados y piedras de gran tamaño que para ser beneficiadas se debe acudir a un trabajo adicional inicial, de ser partidas por medio de un martillo demoledor; también se puede hablar que por ser el río el receptor de otros afluentes, el mejor material es el que le tributa el río Blanco que también nace en el Nevado del Ruiz pero que al parecer su cuenca posee materiales de un tamaño más adecuado para su extracción y que a la vez son más duros para su trituración; también es claro decir que las rocas de color gris claro y de color café claro son mucho más difíciles de triturar por su dureza. Toda esta información ha sido adquirida de una manera visual y del trabajo día a día de los operadores de maquinaria y de la operación de otras plantas de trituración que existen en la cuenca media del río operando, estas están enmarcadas en los títulos de concesión minera otorgados por el estado asociados a las licencias de explotación mecanizada del río expedidas por Corpocaldas.

En ese proceso de trituración también se observa otros aspectos que son más técnicos pero que también tienen que ver con la experiencia, y es así como se afirma que todos los materiales encontrados en el río después de numerosos ensayos de desgaste y solidez, porcentaje de partículas alargadas y planas son aptos para la fabricación de concretos hidráulicos, bases y sub bases granulares, todo ello bajo las normas actuales, además de poderse afirmar que el producto de las trituraciones siempre es un material homogéneo, con piedras muy regulares, no esquistas que serían en algún momento perjudiciales para la buena calidad.

Se debe anotar que con los materiales del río Chinchiná se viene trabando una parte muy importante de la construcción de las ciudades vecinas al río (Chinchiná, Manizales, Villamaría, Palestina; Dosquebradas; Santa Rosa, Pereira, etc.) no solo por su cercanía sino también por su calidad y que solo hace apenas unos años se viene implementando la utilización de triturados en esta zona, primero por la costumbre, segundo por el costo y tercero por la ausencia de plantas de trituración en la zona, con éstos materiales se puede tener la certeza de conseguir mezclas de concreto de excelente calidad, buen aspecto, con consumos de cemento menores a cuando se usaba canto rodado y con muy buenas resistencias eso sí después de un manejo óptimo de las mezclas y de los fraguados y curados de éste.

Ahora bien después de conocer todos éstos aspectos de una manera empírica como ya se enuncio anteriormente se aborda a la tarea de averiguar más profundamente el tema de la calidad de los materiales desde un punto de vista más técnico y poder contribuir así a aumentar la certeza de la durabilidad del concreto fabricado con materiales pétreos del río Chinchiná, incógnita que preocupa pues es lógico que una estructura de concreto debe ser hecha para cientos de años y la información que tenemos es muy reciente de construcciones hechas apenas del siglo XX aunque se puede decir con gran acierto que por lo menos en la ciudad de Manizales no se observan patologías que preocupen en ese aspecto y el otro tema es tratar de aportar de alguna manera a disminuir los costos de los concretos al hacer mezclas más eficientes (económica y ambientalmente) disminuyendo los consumos de cemento.

El concreto es el material mayormente utilizado para la construcción debido a su gran versatilidad al momento de implementarse [1]. Este tipo de materiales se clasifican como materiales compuestos, los cuales se conforman por un aglutinante (cemento portland), un

material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos [2]. Las propiedades del concreto dependen de gran porcentaje a las características y propiedades de los agregados utilizados debido a que son el 70-80% en peso del concreto [3].

De las propiedades, la más importante del concreto estructural es la resistencia a la compresión de este material [4]. Esta propiedad mecánica está altamente relacionada con la composición mineral de los agregados, y éstos varían debido a su fuente de extracción [5,6]. Los agregados o áridos son materiales inertes, de forma, granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento portland en presencia de agua conforman un todo compacto (piedra artificial) que se conocerá como concreto u hormigón [7]. Los agregados gruesos de origen natural más utilizados en la industria son los triturados de rocas extraídos de diferentes fuentes geológicas, estando compuestos por granitos, rocas calcáreas, basálticas y mármol [8].

Las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los agregados permiten especificar y caracterizar estos materiales, encontrando la función de éstos en la preparación de concretos estructurales y optimizando tanto eficiencia como eficacia del concreto para la reducción de costes en el diseño de concretos estructurales [9,10]. La relación entre la composición del concreto y sus propiedades mecánicas ha sido un tema de gran importancia entre los investigadores debido al aumento considerable por parte de nuevos materiales y la incorporación de éstos en las matrices de concreto para la posible aplicación en estructuras [11].

Otra propiedad que es de gran importancia en los concretos es su baja reactividad Alcalí-agregados, cuya reacción produce severa degradación del concreto estructural lo que reduce su durabilidad, deteriorando el material en el transcurso del tiempo [12]. Ésta es una reacción química que sucede en el concreto, la cual induce al desgaste prematuro y contribuyendo así a la pérdida de las propiedades mecánicas en las estructuras de concreto [13].

Esta investigación se plantea en cinco capítulos. El primer capítulo describe el procedimiento que se propuso para desarrollar el problema, los objetivos y la metodología planteada.

El segundo describe mediante revisión bibliográfica las características de los agregados extraídos de ríos, su respectivo origen, su empleo en matrices cementicias, las técnicas utilizadas generalmente para la caracterización de estos materiales y su aplicación para concretos estructurales.

En el tercer capítulo se observa los procedimientos metodológicos, por medio de los materiales y métodos propuestos a partir de la revisión bibliográfica para alcanzar los resultados.

El cuarto muestra los resultados obtenidos por medio de las diferentes técnicas de caracterización y la resistencia obtenida en los distintos grupos de rocas predominantes, estadísticamente.

Y, por último, el quinto capítulo propone analizar y discutir sobre estos resultados y las posibles relaciones o funciones que se establezcan en el contexto de la preparación de concretos a través de la interacción potencial entre composición mineralógica y la resistencia del concreto.

Justificación

A través del tiempo se ha deseado un material eficiente en el área de la construcción el cual cumpla con una alta resistencia al esfuerzo, alta resistencia a la compresión, gran durabilidad y bajo coste económico. El concreto estructural como material compuesto cumple todas las expectativas para el campo de la construcción convirtiéndose en el material más implementado en esta área. Al ser un material compuesto sus propiedades varían con sus componentes, generando gran interés en el estudio de las propiedades del concreto y, por ende, el estudio de cada uno de los materiales que conforman al concreto y sus características.

Los agregados, conformados por las arenas (agregado fino) y las gravas (agregado grueso), constituyen más del 70% en una mezcla para la elaboración del hormigón u concreto, el cual es un material estructural y de construcción por excelencia. Se conocen también como áridos, expresión utilizada para definir un material que no debe tener reacción química de ningún tipo con el material cementante, el agua o con otros aditivos naturales o químicos; sin embargo, el fenómeno de la reacción álcali-agregado descubierta muchos años atrás, muestra que esta pasividad no es tan evidente. Lo anteriormente descrito, constituye razones importantes para conocer acerca de los agregados.

Las condiciones geológicas colombianas definen una litología muy particular en la zona geológica donde se halla ubicado el objeto de estudio, además que las propiedades petrográficas de los agregados gruesos que arrastra el río son diferentes a las de otras formaciones geológicas mundiales. Ésto motiva a que se hagan estudios particulares para conocer las propiedades específicas y en este caso, se insiste en las propiedades composicionales de los agregados que arrastra en el río Chinchiná, debido a que en la cuenca media del río Chinchiná es el lugar de donde se extrae gran parte de los materiales

para toda su área de influencia, que abarca dos departamentos y algunos de los municipios de éstos, por ello es necesario realizar este tipo de estudios en Colombia.

Partiendo de esto, a través de esta investigación se aportaría al estudio de las características y propiedades de uno de los agregados más utilizados para la construcción en el departamento de Caldas y zonas de influencia del río Chinchiná, como lo son Dosquebradas, Santa Rosa, Manizales, Villamaría, Neira y Pereira, entre otros.

En ese sentido, la ejecución de la investigación permite clasificar los agregados partiendo de la composición mineralógica de éstos materiales por medio de secciones delgadas en conjunto con Difractometría de Rayos X (XRD). La composición mineral de éstos agregados, facilita el estudio de la posible reacción Alcalí-agregados que pueden presentar éstos materiales, obteniéndose la calidad de los agregados y como afectan éstos a la durabilidad del concreto por medio de un método alternativo para el análisis de la reacción álcali-agregados.

A nivel práctico, esta investigación viene a representar el primer objeto de estudio de éstos materiales, los cuales se han utilizado a gran escala en esta región, abordando con precisión cuáles son las propiedades que actualmente se presentan en la aplicación de éstos agregados en el concreto, el cual da un criterio para optimizar la preparación de la mezcla del concreto estructural y aportando al diseño de mejores concretos para la construcción con éstos agregados de grano grueso.

Objetivos

Objetivo general: Determinar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales pétreos triturados extraídos de diferentes zonas de la cuenca media del río Chinchiná y evaluar su aporte en el comportamiento mecánico para la producción de concretos estructurales.

Objetivos específicos:

- Evaluar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los agregados triturados extraídos de la zona media del río Chinchiná.
- Evaluar mediante pruebas mecánicas el aporte de los agregados seleccionados en la producción de concreto estructural.

1. Estado del Arte

En este capítulo se describen aquellos aspectos que fortalecen la propuesta para el desarrollo de la tesis de maestría que se pone a consideración en el presente documento. Se tratarán dos bloques, la procedencia y origen de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, y su aplicación como agregado grueso triturado para la implementación de concreto estructural. Con ello se espera abordar el estado de conocimiento aplicado a la finalidad que la tesis busca.

1.1 Concreto

El concreto a través del curso del siglo XX se convirtió en el material de construcción más ampliamente utilizado en todo el mundo. Este material es considerado para la ingeniería civil y de construcción como el material premium tanto en el Reino Unido como en otros lugares del mundo. Ésto se debió a su versatilidad en cuanto a forma y función, lo primero, porque se puede moldear fácilmente y, lo segundo, porque tiene un uso estructural y no estructural. En términos de su competitividad con otros materiales, este contribuyó a un desarrollo ingenieril más amplio; por cuanto su resistencia es más grande a los esfuerzos de compresión y menor a los de tracción. [14, 15, 16].

Conociendo ya la importancia del concreto es necesario especificar en sí que es el concreto. El concreto es un material constructivo el cual se aproxima generalmente como una roca hecha por el hombre. Este material es un compuesto, y como material compuesto está conformado por la unión de dos o más materiales que en conjunto mejoran las propiedades que tienen los mismos materiales singulares. El concreto como compuesto tiene una fase continua y una fase discontinua. La fase continua o matriz es un material cementante fluido que se endurece con el paso del tiempo, y la fase discontinua son los agregados. El material cementante fluidificado generalmente es cemento Portland y agua. Esta mezcla generalmente comprende del 20 al 40% del volumen de concreto. El agregado

normalmente se clasifica en tamaños desde una arena fina hasta fragmentos de piedra que pueden llegar a tener varios centímetros de diámetro, y representa aproximadamente un 70% de la masa total del concreto [16, 17, 18].

El concreto tiene una resistencia a la compresión relativamente alta, pero su resistencia a la tracción es baja, por esta razón suele reforzarse con materiales que son fuertes en tensión, como lo es el acero. La elasticidad del concreto es relativamente constante a bajos niveles de tensión, pero disminuye a mayores niveles de tensión a medida que se desarrolla el agrietamiento de la matriz. El concreto tiene un coeficiente muy bajo de expansión térmica y se contrae a medida que madura. Todas las estructuras de concreto se rompen hasta cierto punto debido a la contracción y la tensión [19].

Las propiedades y características de los materiales compuestos varían dependiendo de las propiedades y características de sus componentes. De este modo, las propiedades y características del concreto se estudian para determinar los diseños de mezcla adecuados para la preparación de éstos en la relación entre los componentes. Además, es de gran interés para la comunidad científica y de construcción las características y propiedades específicas de los componentes del concreto y su aporte a las propiedades del mismo, ya que éstos definirán la calidad del material final [2, 17].

1.1.1 Características del concreto

Anteriormente se había discutido sobre algunas de las características y propiedades deseadas en el concreto sin detallar mucho acerca del tema. Las características que debe tener el concreto son muy específicas para poder cumplir su labor como material por excelencia para el área de construcción e investigación. Al especificar las características se evalúan las diferentes propiedades del concreto, pudiendo así cualificar el material para el desempeño estructuralmente. Todos los ensayos y técnicas tanto de caracterización como de evaluación de las propiedades se describirán en este ítem. Las características que especifican al concreto son:

- El bajo costo ya que contemporáneamente es el material de mayor disponibilidad en el mundo.

-
- El endurecimiento a temperatura ambiente, debido a que es un material inorgánico y las reacciones ocurren a temperatura estándar.
 - La versatilidad y facilidad de trabajo del material, eficiente energéticamente comparándolo con otros materiales implementados en la construcción como lo es el acero.
 - Gran resistencia al agua algo que la madera o el acero no tienen.
 - Excelente resistencia a la temperatura, el cual es ocasionado por los diferentes silicatos de calcio hidratados, siendo reportadas temperaturas de 910 °C sin lograr expulsar el agua estructural completamente.
 - La posibilidad de utilizar desechos como materiales de producción.
 - Implementación en conjunto con el acero, protegiéndolo de agentes externos y mejorando las propiedades mecánicas para aplicaciones estructurales, y bajo requerimiento para el mantenimiento del material [18, 31].

1.1.2 Limitaciones del concreto

El concreto es el material implementado en la industria de la construcción por excelencia, pero, aun así, este tiene ciertas limitaciones al momento de su aplicación. Algunas de las limitaciones que se han reportado son: baja resistencia a la tensión, baja ductilidad, tiempo de curado extenso, necesidad de manejo de la forma (el concreto fresco es fluido y necesita una forma específica hasta endurecerse), modo de falla del tipo cuasi-frágil, la cual se asemeja a la forma de falla del vidrio [2, 18, 31].

1.1.3 Factores que influyen en las propiedades del concreto

Como se había descrito anteriormente, el concreto es un material compuesto y sus propiedades se ven altamente influenciadas por los componentes del material. Adicional a esto, otro factor que aporta a las propiedades del material es la relación agua/material cementante (W/CM), en conjunto con los procesos de curado y el diseño de mezcla. En el siguiente ítem se especificará con mayor detalle los componentes del concreto, sus características y respectivas propiedades.

1.1.3.1 Relación Agua/Cemento (W/CM)

La relación W/CM es uno de los factores más importantes que influyen las propiedades de los concretos. Las propiedades que se modifican con esta variable son: la difusividad, resistencia a compresión y permeabilidad que tiene el concreto. Una baja relación W/CM genera una mayor durabilidad y mejor resistencia a compresión con respecto a concretos producidos con una relación alta [2].

1.1.3.2 Proceso de curado

El curado puede definirse como el proceso que se realiza en el concreto fresco o gel para acelerar las reacciones de hidratación mediante la implementación de variaciones en la mejora de las condiciones que se encuentre el material, variando temperatura ambiente y condiciones de humedad relativa que se encuentra en el concreto fresco. El curado es una medida que puede asegurar un concreto de buena calidad. Lastimosamente esta medida no es tan utilizada en la elaboración de concretos, ignorándola en los sitios de construcción [20, 21]. Algunos de los métodos que son más implementados para realizar el proceso de curado son [22]:

- Curado convencional: temperatura constante a 23°C y humedad relativa del 95%.
- Tratamiento de calor a 60°C: temperatura constante a 90°C sin condiciones de humedad relativa controlada. Después de 24 horas de su fabricación se expone a dicha condición durante 24 horas en un horno convencional. Finalmente, el concreto se somete nuevamente al curado convencional hasta la edad de falla.
- Tratamiento de calor a 90°C: temperatura constante a 60°C sin condiciones de humedad relativa controlada. Después de 24 horas de su fabricación se expone a dicha condición durante 24 horas en un horno convencional. Finalmente, el concreto se somete nuevamente al curado convencional hasta la edad de falla.
- Tratamiento de vapor a 90°C: temperatura constante a 90°C. Después de 24 horas de su fabricación se expone a dicha condición durante 24 horas en una cámara de vapor

y finalmente el concreto se somete nuevamente al curado convencional hasta la edad de falla.

- Tratamiento de vapor a 60°C “Acelerado”: temperatura constante a 60°C. 1 hora pasada de su fundición se expone a dicha condición durante 24 horas. Por último, el concreto se somete nuevamente al curado convencional hasta la edad de falla.

1.1.4 Tipos de concretos

Existen tantas variedades de concretos como aplicaciones pueda tener. El proceso para determinar las características específicas requeridas del concreto es llamado diseño de mezcla. La selección de una mezcla de concreto depende de la necesidad del proyecto, tanto en términos de fuerza y apariencia como en relación con la legislación y los códigos de construcción locales. El diseño de la mezcla inicia con la determinación de los requisitos del concreto. Estos requisitos tienen en cuenta las condiciones meteorológicas a las que estará expuesto en el servicio y la resistencia de diseño requerida. Hay muchos factores que deben tenerse en cuenta, como lo es el coste de los diversos aditivos y agregados, la fluidez y el rendimiento final tanto en resistencia como durabilidad. Los principios para el diseño de mezcla de concretos son de suma importancia para establecer las proporciones necesarias de la mezcla y sólo con una adecuada selección de materiales y sus respectivas proporciones en la mezcla puede obtenerse un concreto de buena calidad [23].

Los concretos se pueden clasificar dependiendo del peso unitario, de acuerdo con la resistencia a compresión y según los aditivos que se implementan. Algunos de éstos se describirán a continuación:

1.1.4.1 Concretos según su resistencia a compresión

Los concretos que se clasifican con respecto a su desempeño en la resistencia a compresión son:

- Concreto regular: este tipo de concreto está regido por los diseños de mezclas publicados por las distribuidoras de cemento. Generalmente este concreto está conformado por cemento Portland, agregado fino, agregado grueso y agua, soportando

un rango de presiones aproximadamente de 10 (1450 psi) a 40 MPa (5800 psi). Normalmente es utilizado para la construcción de obras para la vivienda [24].

- Concreto de alta resistencia: se caracteriza por tener una resistencia superior a 40 MPa (5800 psi). La alta resistencia característica de este concreto es debido a la baja relación de W/CM) siendo del orden de 0,35 o menor. Usualmente se le adiciona fracciones de humo de sílice para evitar la cristalización del Ca(OH)_2 , el cual genera una disminución en la resistencia por parte del concreto. Las bajas relaciones W/CM y la implementación del humo de sílice vuelven la mezcla menos fluida, debido a ésto se implementan superplastificantes para compensar la trabajabilidad de la mezcla que fue perdida. En algunas aplicaciones de alta resistencia el criterio de diseño es el módulo de elasticidad más que la resistencia a la compresión final [25].

- Concreto de alto rendimiento: el concreto de alto rendimiento (HPC por sus siglas en inglés) es un término relativamente nuevo que está por encima de las aplicaciones comunes especificadas por las normas, pero no está limitado por la resistencia a compresión. Se caracteriza por una baja relación de W/CM, siendo aproximadamente de 0,30 a 0,40. Éstos concretos además de contener un material cementante, agua y agregados contiene aditivos y adiciones que refuerzan y mejoran sus propiedades tanto en estado plástico como endurecido. Los HPC tienen tres características específicas: alta resistencia a compresión, alta fluidez y alta durabilidad [26, 27].

- Concreto de ultra alto rendimiento: el concreto de ultra-alto rendimiento (UHPC por sus siglas en inglés) es un tipo de concreto innovador que está siendo desarrollado por los organismos encargados de la protección de la infraestructura. UHPC se caracteriza por ser un material compuesto de cemento reforzado con fibra de acero con resistencias a la compresión superiores a 150 MPa y posiblemente superiores a 250 MPa. Los componentes característicos de UHPC son: arena de grano fino, humo de sílice, pequeñas fibras de acero, superplastificantes y mezclas especiales de cemento Portland de alta resistencia. No se utilizan los agregados gruesos. Las investigaciones en curso sobre el fallo de la UHPC a través de la tracción y el fallo de corte se están

llevando a cabo por múltiples agencias gubernamentales y universidades de todo el mundo [28, 29, 30].

1.1.5 Componentes del concreto

Como anteriormente se describió, los componentes del concreto varían dependiendo de la implementación de este material. La composición del concreto, en este caso regular, está dada por: material cementante, agua y agregados grueso. A continuación, se describe con mayor detalle cada material que compone al concreto y sus especificaciones técnicas para la implementación en concretos estructurales.

1.1.5.1 Cemento

Se denomina a los materiales que componen la fase continua del concreto como materiales cementantes debido al reciente uso de materiales cementicios para el reemplazo parcial del cemento. Se caracterizan por tener menores contenidos de calcio que el cemento Portland y altos contenido de sílice amorfa, lo cual influencia la resistencia a la compresión y la durabilidad final del concreto [31].

El cemento es un material aglutinante, un compuesto que es usado en la construcción para fijar, endurecer y adherir otros materiales. Es un componente de los morteros y los concretos. Los cementos utilizados en la construcción son usualmente de carácter inorgánico, siendo a base de silicatos de calcio y pueden caracterizarse como hidráulicos y no hidráulicos dependiendo de la capacidad para fijarse en presencia de agua [32].

- Los cementos hidráulicos consisten generalmente en silicatos, aluminatos y ferritoaluminatos de óxidos de calcio. Los silicatos son los responsables de las propiedades mecánicas del cemento. Existen trazas de MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O y Na_2O . Éstos compuestos usualmente no alcanzan más del 1% de la masa del cemento. El cemento hidráulico se endurece y se hace adhesivo debido a una reacción química entre los componentes secos y el agua. La reacción química resulta en hidratos minerales que no son muy solubles en agua y por lo tanto son bastante duraderos en agua, lo cual protege al concreto de los ataques químicos [33, 34]. Entre los cementos

hidráulicos está el Portland., y este a su vez tiene sus diferentes tipos. Los tipos de Cemento portland se encuentran en la tabla 1-1.

- Otros tipos de cementos hidráulicos que existen son el expansivo (NTC 4578) [35], el estándar [36], el de ceniza volante, puzolana natural y materiales calcinados NTC 3493 [37], la escoria granulada molida de alto horno NTC 4018 [38], Humo de Sílice NTC 4637 [39], el cemento blanco [40], entre otros.

Tabla 1-1: Clasificación de los tipos de cementos Portland [15, 35].

CLASE	PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
Portland Tipo I	Normal	De uso general. Se destina a obras de concreto que no estén sujetas al contacto de factores agresivos (por ejemplo, el ataque de sulfatos existentes en el suelo o el agua), o a concretos que tengan un aumento cuestionable de la temperatura debido al calor generado durante la hidratación. Entre sus usos están: pavimentos, pisos, edificios de concreto reforzado, puentes estructuras para vías férreas, tanques y depósitos, tubería, mampostería y otros productos de concreto reforzado.
Portland Tipo I-M	Normal mayores resistencias	De uso generalizado. No se le exige propiedades especiales, pero tiene resistencias superiores a las de tipo I.
Portland Tipo II	De resistencia moderada a los sulfatos	Usado en obras de concreto expuestas a la acción moderada de sulfatos, por ejemplo, en estructuras enterradas en zonas donde las concentraciones de éstos, en las aguas freáticas. Este tipo de cemento genera moderado calor de hidratación, lo que lo hace adecuado para estructuras de volumen considerable (pilas de gran masa, estribos grandes y muros de contención). Su empleo reduce el aumento de la temperatura, hecho muy importante al fundir concreto en climas cálidos
Portland Tipo III	De alta resistencia inicial	Desarrolla altas resistencias a edades tempranas, normalmente a una semana o menos. Químicamente y físicamente es parecido al cemento Portland tipo I, excepto que sus partículas han sido molidas más finamente. Se emplea cuando las formaletas deben ser removidas rápidamente o cuando se tenga que poner la estructura en servicio pronto.
Portland Tipo IV	De bajo calor de hidratación	Se recomienda para mantener al mínimo la velocidad y cantidad del calor de hidratación. Desarrolla resistencia a una velocidad muy inferior a la de otros tipos de cemento. Se usa para estructuras de concreto masivo, como presas de gravedad grandes, donde el aumento de temperatura resultante en el transcurso del endurecimiento se tenga que conservar en el menor valor posible.
Portland Tipo V	De resistencia elevada a los sulfatos	Ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos y se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de éstos, especialmente en suelos o aguas freáticas que tengan alto contenido de sulfato. Su resistencia es adquirida más lentamente que el cemento Portland tipo I
Portland Blanco	Color blanco, normalmente tipo I o III.	Se obtiene con materiales que le confieren una coloración blanca, de tal forma que sólo difiere del cemento Portland por su color. Se produce con materias primas que contienen cantidades muy pequeñas de óxidos de hierro y manganeso, las cuales le dan el color gris. Se utiliza principalmente con finalidades arquitectónicas en muros estructurales, concreto prefabricado y concreto reforzado con fibras de vidrio.

- El cemento no hidráulico se endurece por la carbonatación en presencia de dióxido de carbono que naturalmente está presente en la atmosfera. Esta reacción toma una gran cantidad de tiempo a causa de la baja presión parcial del dióxido de carbono en el aire. La reacción de carbonatación requiere que el cemento seco esté expuesto al aire, por lo que es un cemento no hidráulico y puede implementarse bajo el agua. Todo este proceso es llamado el ciclo de la cal [41].

1.1.5.2 Normas técnicas para los cementos

De acuerdo con el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) [42], el cemento utilizado en una obra estará dado por el proyecto o especificación particular de acuerdo con el cemento hidráulico de uso general: Portland tipo I (norma ASTM C-150), tipo IS o IP (norma ASTM C595), o tipo GU (norma ASTM C1157).

La Norma Sismo Resistente del 2010 (NSR-10), especifica que los materiales cementantes que se utilizan para la preparación de concretos estructurales pueden ser de distinto tipo y cumplir con cierta normativa de acuerdo con su función en obra [43]. Son comunes los cementos hidráulicos fabricados bajo la norma ASTM C595, que excluyen el de tipo IS (≥ 70) que no pueden ser utilizados como cementante principal en dicha preparación [44].

Se puede hacer uso del cemento IS (≥ 70) para dicha preparación de concreto, debido a que contiene escoria granulada de alto horno, descrito por la NSR-10, el cual es permitido por la NTC 321 y ASTM C150 [7].

1.1.5.3 Agua

El agua es un componente importante en el concreto ya que participa en las reacciones de hidratación del cemento. Aporta desde la forma hasta la resistencia a la compresión del concreto. Para la obtención de un concreto específico de gran calidad es necesario conocer la pureza del agua y la cantidad que se adiciona en la mezcla [2].

El agua que se emplee para las mezclas de concreto hidráulico deberá ser limpia y libre de aceites, ácidos, azúcar, materia orgánica y cualquier otra sustancia perjudicial al concreto terminado [43].

Han sido reportadas normas técnicas en el cual hacen uso de diferentes fuentes de agua para la implementación en concretos, algunas son: agua potable, agua recuperada de procesos en la industria del concreto, agua de fuentes subterráneas, aguas superficiales naturales e industriales para concreto armado y agua de mar o agua salobre para la producción de concreto sin refuerzo ni con otro metal incrustado.

El agua de alcantarillado no es adecuada para la producción de hormigón. En el agua natural o agua dulce es poco probable encontrar concentraciones mayores a 2000 ppm de sólidos disueltos, por lo tanto, es adecuada para hacer concreto generalmente. Se puede tolerar concentraciones mayores de impurezas en agua natural, excepto los carbonatos y bicarbonatos alcalinos que pueden tener efectos significativos en concentraciones mayores o iguales a 2000 ppm. El agua contaminada con residuos industriales es adecuada para hacer concretos siempre y cuando esté libre de sólidos en suspensión y en pocas cantidades. Otras impurezas inorgánicas de posible origen industrial, que pueden ser perjudiciales a concentraciones moderadas, son los sulfuros, yoduros, fosfatos, arseniatos, boratos y compuestos de plomo, zinc, cobre, estaño y manganeso que afectan adversamente las propiedades del hormigón. Las impurezas orgánicas también pueden cambiar las propiedades del concreto, especialmente el azúcar presente [43, 44, 45].

1.1.5.4 Agregados

Los agregados en una mezcla del concreto constituyen entre un 70-80% en volumen de la misma, sin dejar de ser igual de importante a la pasta de cemento endurecida, agua, aire o aditivos. Al contrario, las características del concreto dependen, tanto en estado plástico como en estado endurecido, de las características y propiedades de los agregados, los cuales se deben estudiar para obtener concretos de calidad y económicos. Con esta definición se agrupan las arenas, gravas naturales y la piedra triturada, con la cual se elaboran también morteros y concretos especiales, como los concretos ligeros, pesados y de alto rendimiento [46, 47].

Las características deseables de los agregados son: limpieza, los agregados deben estar exentos de arcilla, limo, mica, materia orgánica, sales químicas y granos recubiertos, estabilidad frente cambios de temperatura y humedad, y buena resistencia [48].

Los agregados que cumplen con las condiciones específicas deseadas se denominan agregado de calidad, y se constituyen por partículas durables, limpias, duras y resistentes.

1.2 Agregados

Los agregados o áridos son materiales inertes, de forma, granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento portland en presencia de agua conforman un todo compacto (piedra artificial) que se conocerá como concreto. Un agregado grueso se define como la porción retenida en el tamiz 4.75 mm (No. 4). Las rocas naturales de arrastre o de grava o por una combinación de ambas, son las procedencias de los agregados; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables. Ésto para contribuir a la consistencia y durabilidad de los distintos proyectos a los que tuviere lugar su preparación especificada, por el mismo, para cada tipo de concreto [7, 41, 48].

Entre los diferentes tipos de agregados, los agregados que son de carácter artificial se encuentran en los subproductos industriales o urbanos que reúnen las condiciones para su implementación en la producción de concretos, algunos son: estériles de explotaciones mineras, cenizas volantes de centrales térmicas, residuos de combustión de residuos urbanos, materiales de demolición y escorias de procesos siderúrgicos o metalúrgicos [49, 50].

1.2.1 Clasificación de los agregados

Los agregados se clasifican dependiendo del tamaño del grano, grueso o fino, de la fuente de procedencia, como arenas de ríos o granos redondeados, de la naturaleza química, por ejemplo, las procedentes de granitos y basaltos, y del sistema de obtención como lo son los triturados o de canto rodado [27].

Desde el punto de vista petrológico, los agregados ya sean triturados o naturalmente reducidos en tamaño se pueden dividir dentro de grupos de rocas con características comunes.

La ASTM C 294-05 describe los minerales más importantes que han sido encontrados en los agregados. La clasificación mineralógica ayuda a reconocer propiedades del agregado, pero no puede dar bases para predecir el comportamiento en el concreto. ASTM clasifica los minerales de la siguiente forma [51]:

- Minerales de sílice (cuarzo, ópalo, calcedonia, cristobalita).
- Feldespato.
- Minerales ferromagnéticos.
- Minerales micáceos.
- Arcillas minerales.
- Zeolitas.
- Minerales carbonato.
- Minerales sulfato.
- Minerales de sulfatos de hierro.
- Óxidos de hierro.

De acuerdo con esto, el examen geológico del agregado es una ayuda útil para evaluar su calidad y, en particular, comparar un nuevo agregado con uno para el cual los registros de servicio están disponibles. Además, se pueden detectar propiedades adversas, tales como la presencia de algunas formas inestables de sílice. Incluso pequeñas cantidades de minerales o de rocas pueden tener una gran influencia en la calidad del agregado. En el caso de agregados artificiales, también se puede estudiar la influencia de los métodos de fabricación y de procesamiento [52].

1.2.2 Especificaciones de los Agregados para Concreto NTC 174 [53]

Esta norma especifica las propiedades físicas y mecánicas que deben poseer los materiales pétreos idealmente, y en las condiciones que se deben utilizar las técnicas

descritas por la misma de acuerdo a los objetivos que se propone para su uso y aplicación. Se desarrollan los puntos con mayor interés para este objetivo.

Las características que se requieren para la preparación de concretos, establecen también los requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos (exceptúa los livianos y pesados); por último, determina la variación que pueden poseer los mismos en gradación y calidad según las zonas de procedencia, lo que indica la posibilidad de asegurar materiales satisfactorios para su uso en la mayoría de concretos.

De acuerdo a los intereses de esta investigación se especifican las características de los agregados gruesos y sus particularidades en preparación de materiales.

1.2.2.1 Agregado grueso

El agregado grueso debe estar compuesto de grava, grava triturada, roca triturada, escoria de alto horno enfriada al aire, o concreto triturado fabricado con cemento hidráulico o una combinación de ellos, conforme a los requisitos de la norma y el proyecto a desarrollarse. Se recomiendan los tamaños por tamices de la tabla 1-2, la cual sigue la norma técnica.

1.2.3 Test para agregados

Los ensayos de varias propiedades del agregado se realizan obligatoriamente en muestras del material y, por lo tanto, los resultados de las pruebas se aplican solamente al agregado de la muestra. Puesto que, el tema de interés reside en la mayor parte del agregado tal como se suministra, o como se encuentra disponible para el suministro, se debe asegurar que la muestra es típica de las propiedades promedio del agregado. Dicha muestra se dice que es representativa y, para obtenerla, se deben observar ciertas precauciones en la obtención de la muestra. Sin embargo, no pueden establecerse procedimientos detallados porque las condiciones y las situaciones de toma de muestras en el terreno pueden variar ampliamente de un caso a otro. La muestra principal se compone de una serie de porciones extraídas de diferentes partes del conjunto. El número mínimo de estas porciones, denominadas incrementos, es diez, y deben sumar hasta una masa no inferior a la dada en la Tabla 3.2 para partículas de diferentes tamaños, según lo prescrito en BS 812: 102: 1989 (reemplazado por BS EN 932 -1: 1997) [54].

Tabla 1-2: Clasificación de agregados grueso según tamaño de tamiz [53].

Número del tamaño del agregado	Tamaño nominal (mm)	Material que pasa uno de los siguientes tamices (porcentaje en masa)												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm
		4"	3.5"	3"	2.5"	2"	1.5"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16
1	90 a 37,5 mm	100	90-100		25- 60		0-15		0-15					
2	63 a 37,5 mm			100	90-100	35-70	0-15		0-15					
3	50 a 25,0 mm				100	90-100	35-70	0-15		0-15				
357	50 a 4,75 mm				100	90-100		35-70		10-30		0-15		
4	37,5 a 19,0 mm					100	90-100	20-55	0-15		0-15			
467	37,5 a 4,75 mm					100	95-100		35-70		10-30	0-15		
5	25,0 a 12,5 mm						100	90-100	20-55	0- 10	0-5			
56	25,0 a 9,5 mm						100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5		
57	25,0 a 4,75 mm						100	95-100		25-60		0-10	0-5	
6	19,0 a 9,5 m							100	90-100	20-55	0-15	0-5		
67	19,0 a 4,75 mm							100	90-100	90-100	20-55	0-10	0-5	
7	12,5 a 4,75 mm								100	100	40-70	0-15	0-5	
8	9,5 a 2,36 mm										85-100	10-30	0-10	0-5

La muestra principal puede ser bastante grande, sobre todo cuando se utilizan agregados de gran tamaño, por lo que la muestra debe reducirse antes de la prueba. En todas las etapas de la reducción, es necesario garantizar que el carácter representativo de la muestra se retiene de modo que la muestra de ensayo real tenga las mismas propiedades que la muestra principal e *ipso facto* como la mayor parte del agregado.

Hay dos maneras de reducir el tamaño de una muestra, acuartelamiento y *riffling*. Para el acuartelamiento, la muestra principal se mezcla a fondo y, en el caso del agregado fino, se humedece para evitar la segregación.

1.2.4 Forma y textura de los agregados

Además del carácter petrológico del agregado, las características externas como la forma y la textura superficial. La forma generalmente es medida por la redondez, y la redondez es la medida de los ángulos en las esquinas y bordes del agregado. La redondez es controlada por la resistencia y la resistencia a la abrasión de la roca madre.

En el caso del agregado triturado la forma no sólo depende de la naturaleza del material triturado, también depende del tipo de trituradora y su relación de reducción, es decir, la relación del tamaño del material antes y después del proceso de trituración.

La clasificación usualmente implementada en E.E.U.U. puede observarse a continuación [60]:

- Bien redondeado, sin caras originales a la izquierda.
- Redondeado, las caras casi desaparecieron.
- Subredondeada, un desgaste considerable, caras reducidas en área.
- Subangulares, algunos desgastes, pero las caras intactas.
- Angular, poca evidencia de desgaste

Otro aspecto de la forma del agregado grueso es su esfericidad, definida como una función de la relación entre el área superficial de la partícula y su volumen. La esfericidad se relaciona con el lecho y la escisión de la roca madre, y también está influenciada por el tipo de equipo de trituración cuando se ha reducido artificialmente el tamaño de las

partículas. Las partículas con una alta proporción de área superficial a volumen son de particular interés, ya que aumentan la demanda de agua para una trabajabilidad dada de la mezcla de hormigón. Generalmente no se prefiere tener un agregado grueso con forma equidimensional, ya que la diferencia entre sus superficies ocasiona un empaquetamiento anisotrópico [56].

Dos tipos de formas que se apartan de la forma equidimensional son: alargada y escamosa. Estas formas son de interés, y en especial la última ya que puede afectar adversamente la durabilidad del concreto. Al implementarse esta forma de agregado tiende a orientarse en un plano con el agua de sangrado y los huecos de aire formándose debajo de él. La presencia de partículas alargadas en exceso de 10 a 15% de la masa de agregado grueso generalmente se considera indeseable pero no se establecen límites reconocidos [57].

La textura superficial del agregado afecta considerablemente el comportamiento adhesivo con la pasta de cemento y también influencia la cantidad requerida de agua para la mezcla, especialmente para el agregado fino. La clasificación de la textura de la superficie se basa en el grado en que las superficies de las partículas estén, ya sea pulido o mate, lisa o rugosa. La textura superficial depende de la dureza, el tamaño del grano y las características del poro del material madre [56].

Considerando lo descrito anteriormente se puede observar que tanto la forma y la textura superficial del agregado influyen considerablemente en la resistencia del concreto, en especial en la resistencia a la flexión. Los efectos de la forma y la textura de los agregados son particularmente significativos para los concretos de alta resistencia.

El papel completo que desempeña estas características en el desarrollo de la resistencia del concreto no es conocido, pero posiblemente la rugosidad afecta la forma en la que interactúan tanto el agregado como la pasta de cemento en el proceso de adhesión. Entonces, a mayor rugosidad resultara en una mejor adhesión entre estos dos componentes del concreto, de igual modo con la angularidad del agregado.

1.2.5 Adhesión del agregado

La adhesión que ocurre entre el agregado y la pasta de cemento es un factor importante que influye en la resistencia del concreto, especialmente la resistencia a flexión. El enlace se debe al incrustamiento del agregado en la pasta de cemento hidratado debido a la rugosidad de la superficie del agregado. Una superficie más rugosa, como las partículas trituradas, resulta en un mejoramiento en el enlace debido al incrustamiento mecánico. El mejor enlace es obtenido con partículas más suaves, porosas y mineralógicamente heterogéneas. Este enlace se ve afectado por características físico-químicas del agregado relacionadas con su composición mineralógica y química [58].

Como se había descrito anteriormente el concreto es un material compuesto, y como material compuesto por la pasta de cemento hidratado, si está fresco, o curado si ya está endurecido, por lo tanto, las propiedades mecánicas del agregado se ven afectadas por las propiedades mecánicas de ambos componentes.

Neville [59], reportó que después de una edad muy temprana, el camino de fisura no está influenciado por la resistencia de la matriz de mortero. Los factores que influyen en este fenómeno principalmente son la fuerza de la roca madre, la forma y la textura superficial de los agregados.

1.2.6 Fuerza del agregado

La resistencia a la compresión del concreto no puede exceder a la de la mayor parte de los agregados contenidos en el mismo, aunque no es un trabajo sencillo el establecer cuál es la resistencia de las partículas de forma individual, de hecho es difícil probar la resistencia a compresión de los agregados de manera individual y la información que se requiere se obtiene con ensayos indirectos: valor de trituración del agregado, fuerza para compactar el agregado y el rendimiento del agregado en el concreto. Si el agregado sometido a testeo conduce a una menor resistencia a la compresión del concreto, y en particular, si numerosas partículas de agregado individuales aparecen fracturadas después del ensayo, la resistencia del agregado es inferior a la resistencia nominal a la compresión del concreto.

En general, la resistencia y elasticidad del agregado dependen de su composición, textura y estructura, de este modo una baja resistencia puede ser debida a la debilidad de los granos constituyentes o los granos pueden ser resistentes, pero no estar bien unidos [60].

Un buen valor medio de la resistencia al aplastamiento del agregado es de aproximadamente 200 MPa, pero muchos excelentes agregados varían en resistencia desde 80 MPa. Uno de los valores más altos registrados es de 530 MPa para una determinada cuarcita. La resistencia del agregado es considerablemente más alta que el rango normal de las resistencias del concreto debido a que las tensiones reales en la interfase de partículas individuales dentro del concreto pueden ser muy superiores a la tensión de compresión nominal aplicada. Por otra parte, el agregado de resistencia moderada o baja, y de igual forma para el módulo de elasticidad pueden ser valiosos para preservar la integridad del concreto. Los cambios de volumen del concreto, derivados de causas hídricas o térmicas, conducen a una menor tensión en la pasta de cemento hidratado cuando el agregado es compresible. En caso contrario, si el agregado es muy duro y resistente podría ocasionar craqueo de la pasta de cemento circundante [61].

1.2.7 Otras propiedades mecánicas del agregado

Varias propiedades mecánicas deben tenerse en cuenta si el agregado se va a implementar en la construcción de pavimentos o se va a someter a un alto desgaste. La primera es la tenacidad, la cual puede definirse como la resistencia de una muestra de roca al fallo por impacto. Esta prueba revelaría los efectos adversos de la erosión de la roca, pero no es utilizada [18].

Además de la resistencia y dureza, la dureza o la resistencia al desgaste es una propiedad importante del concreto utilizado en pavimentos y en superficies de suelos sometidos a tráfico pesado. Existen varios ensayos porque es posible causar desgaste del agregado por abrasión, es decir por frotamiento de un material extraño contra la piedra sometida a ensayo, o por desgaste de las partículas de piedra entre sí. Cabe señalar que algunas rocas calizas están sujetas a desgaste, y su uso en el pavimento de concreto debe estar condicionada a la prueba de abrasión [62].

1.2.7.1 Desgaste de los agregados en la Máquina de los Ángeles

Una prueba americana que combina desgaste y abrasión es la prueba de Los Ángeles, la cual se también se utiliza con frecuencia en otros países, porque sus resultados muestran una buena correlación no sólo con el desgaste real del agregado cuando se utiliza en concreto, sino también con las resistencias a la compresión y flexión del concreto fabricado con el agregado dado. En este ensayo, el agregado de la clasificación especificada se coloca en un tambor cilíndrico, montado horizontalmente, con un estante en el interior. Una carga de bolas de acero se añade, y el tambor se gira un número especificado de revoluciones. La caída del agregado y de las bolas resulta en abrasión y desgaste del agregado, y ésto se mide de la misma manera que en el ensayo de desgaste. La prueba de Los Ángeles se puede realizar en agregados de diferentes tamaños, obteniéndose el desgaste por una masa apropiada de la muestra y de la carga de bolas de acero, y por un número adecuado de revoluciones. En la tabla 1-3 se puede observar los valores de prueba de diferentes agregados. Las diversas cantidades están prescritas por ASTM C 131-06 [63].

Tabla 1-3: Promedio de los valores de prueba para las rocas británicas de diferentes grupos [56, 64].

Grupo de rocas	Resistencia a la trituración		Valor de abrasión	Valor de impacto	Gravedad específica	Valor de desgaste	
	MPa	psi				Seco	Húmedo
Basalto	200	29000	17,6	16	2,85	3,3	5,5
Sílex	205	30000	19,2	17	2,55	3,1	2,5
Gabro	195	28500	28,7	19	2,95	2,5	3,2
Granito	185	27000	18,7	13	2,69	2,9	3,2
Arenisca	220	32000	18,1	15	2,67	3,0	5,3
Corneana	340	49500	18,8	17	2,88	2,7	3,8
Caliza	165	24000	16,5	9	2,69	4,3	7,8
Pórfidos	230	33500	19,0	20	2,66	2,6	2,6
Cuarcita	330	47500	18,9	16	2,62	2,5	3,0
Esquistos	245	35500	18,7	13	2,76	3,7	4,3

1.2.8 Gravedad específica

La gravedad específica de los agregados es definida a partir del contenido de poros, tanto permeables como impermeables. La densidad absoluta se refiere al volumen del material sólido excluyendo todos los poros [64].

1.2.9 Densidad Bulk

La densidad aparente o densidad Bulk depende de cuán densamente se compacta el agregado y se deduce que, para un material de una gravedad específica dada la densidad aparente depende de la distribución de tamaño y la forma de las partículas: todas las partículas de un tamaño pueden ser empacadas. De forma limitada se pueden añadir partículas más pequeñas en los vacíos entre las más grandes, aumentando así la densidad aparente del material empaquetado. Para un agregado grueso de densidad específica dada, una densidad aparente más alta significa que hay menos huecos para ser llenados por agregado fino y cemento, y la prueba de densidad aparente se utilizó en un momento como base de dosificación de mezclas [65].

1.2.10 Porosidad y absorción del agregado

La porosidad del agregado, su permeabilidad y absorción influyen en las propiedades del agregado como el enlace entre éste y la pasta de cemento hidratado, la resistencia del hormigón a la congelación y descongelación, así como su estabilidad química y resistencia a la abrasión. Los poros en agregado varían en tamaño en un amplio intervalo, siendo el más grande, lo suficientemente grande para ser visto bajo un microscopio o incluso a simple vista, pero incluso los poros de agregado más pequeños son mayores que los poros de gel en la pasta de cemento. El agua puede entrar en los poros, la cantidad y la tasa de penetración dependiendo de su tamaño, continuidad y volumen total. Dado que el agregado representa aproximadamente tres cuartas partes del volumen del concreto, es evidente que la porosidad del agregado contribuye materialmente a la porosidad total del concreto [66].

1.2.11 Sustancias nocivas del agregado

Existen tres categorías de las sustancias dañinas para el agregado: las impurezas, los recubrimientos y ciertas partículas individuales que son débiles o inservibles en sí mismas. Todo o parte del agregado también puede ser dañino a través del desarrollo de reacciones químicas entre los componentes del concreto [67].

1.2.11.1 Impurezas orgánicas

Los agregados naturales pueden ser suficientemente fuertes y resistentes al desgaste y, sin embargo, pueden no ser satisfactorios para la fabricación de hormigón si contienen impurezas orgánicas que interfieren con las reacciones químicas de hidratación. La materia orgánica que se encuentra en agregado consiste por lo general de los productos de descomposición de la materia vegetal (principalmente ácido tánico y sus derivados) y aparece en forma de humus o franco orgánico. Es más probable que éstos materiales estén presentes en la arena que en el agregado grueso, que se lava fácilmente [37].

1.2.12 Agregados triturados de origen volcánico

En este tópico se abordarán, con respecto a la información suministrada anteriormente, las condiciones tanto geológicas como petrográficas sobre los agregados trabajados en esta tesis y sus respectivos conceptos para la comprensión del fenómeno que puede tener la muestra problema. Entonces, lo primero en especificar son las condiciones y lugar donde se obtienen las muestras.

1.3 Río Chinchiná

El área donde se realizó el estudio se ubica en la zona de influencia de la cabecera municipal del Municipio de Chinchiná en el departamento de Caldas Figura 1-1. Entre los 1.250 y 1.610 m de elevación, en las coordenadas geográficas 5°01' N y 75°36' W. Se encuentra en la cuenca del río Chinchiná en la vertiente occidental de la cordillera Central.

El régimen pluviométrico de la zona es de tipo bimodal, caracterizado por dos épocas lluviosas abril-mayo, octubre-noviembre, y dos de menores lluvias que van de enero a

febrero y julio a agosto. El total anual de lluvia es de 2510 mm, el número de días con lluvia al año totaliza 240, la lluvia máxima en un día ha alcanzado 152 mm, la cual se espera que ocurra con una probabilidad del 2%.

La temperatura del aire media anual es de 21°C. La zona en general presenta condiciones de alta nubosidad, la humedad relativa anual es de 77%. El clima es influenciado principalmente por la zona de convergencia intertropical y los fenómenos frío y cálido del pacífico [68, 69].

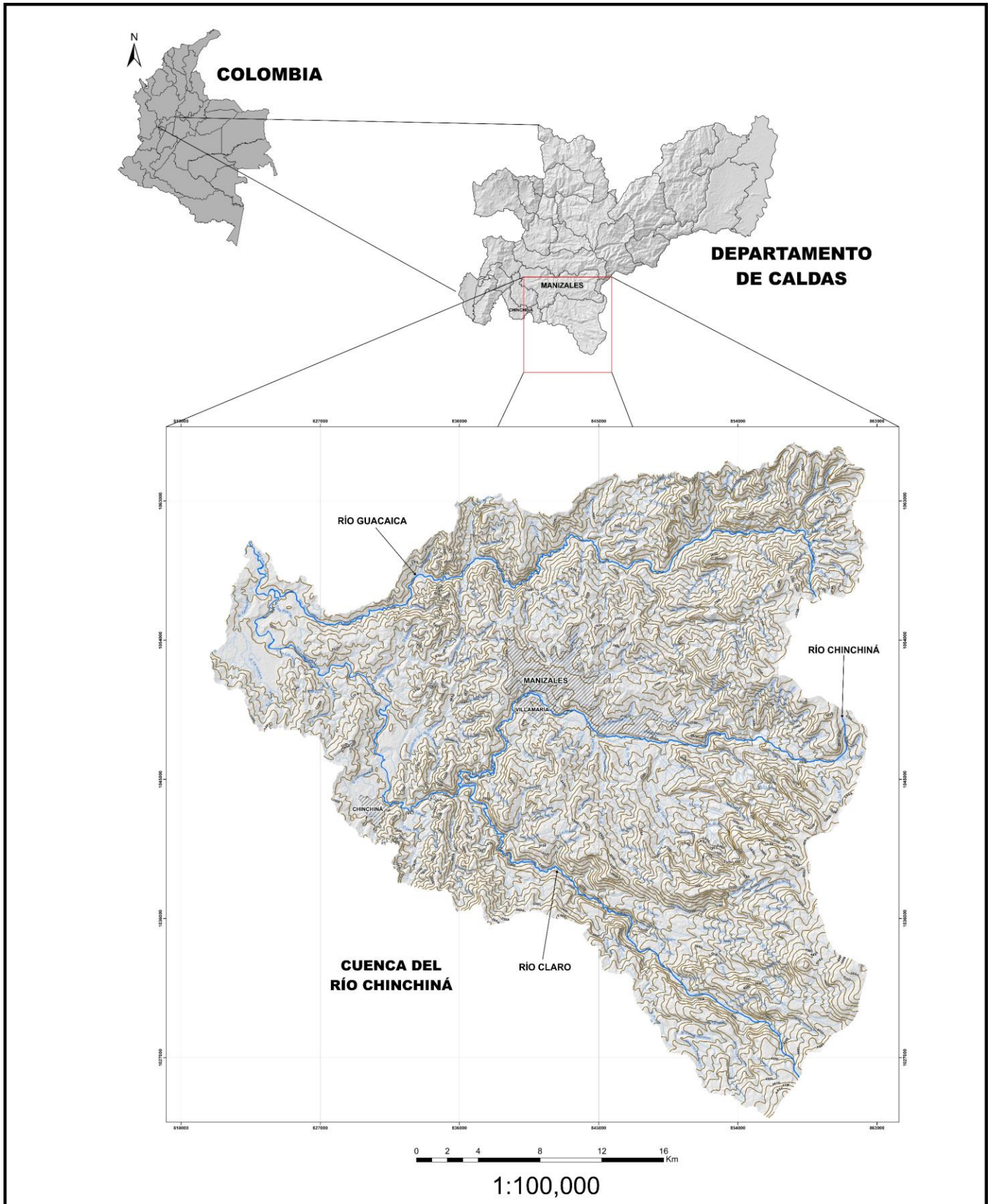
1.3.1 Geología del sector

La litología que aflora en el área de influencia a nivel regional ha sido estudiada por muchos investigadores. Según Toussaint y Restrepo [70], el Complejo Quebradagrande de edad Cretácica incluye rocas volcánicas y sedimentarias, éstas últimas consistentes en areniscas líticas, brechas sedimentarias, conglomerados polimícticos con clastos volcánicos, además cuarzo lechoso, fragmentos de anfibolitas, chert, lutitas, lentes de calizas y grauvacas. Todo el paquete con buzamiento alto salvo excepciones locales. La unidad como tal, según Naranjo [71], ha pasado de una alta diagénesis a un metamorfismo de baja presión. Cabe destacar que en su litología se da la presencia de rocas carbonosas altamente inestables por su notoria susceptibilidad a la rápida alteración.

Maya y González [72], definen al Complejo Cajamarca como un paquete metamórfico compuesto por esquistos cuarzo-sericíticos, esquistos verdes, filitas, cuarcitas y algunas franjas de mármoles. Sin embargo, en otros estudios, Maya [73], describe esta unidad como conformada por esquistos sericíticos, esquistos actinolíticos-cloríticos, cuarcitas y mármoles de las facies esquistos verde de baja presión.

González [74], en estudios que realizó sobre el Stock de Manizales, lo clasificó como una cuarzodiorita de grano medio a grueso, de textura hipidiomórfica granular, cuyos componentes principales son: cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y biotita, accesorios como apatito, zircón, esfena, epidota y allanita. La roca es leucocrática y en partes puede contener hornblenda.

Figura 1-1: Localización zona de estudio.



Álvarez [75], realizó una datación del Stock de Manizales, por huellas de fisión en zircón donde obtuvo 62.4 ± 3.6 M.a. Presenta afloramientos más o menos amplios en las dos vertientes de la Cordillera Central. Al lado occidental del macizo volcánico del Ruiz, se encuentran amplios afloramientos en las cabeceras de la quebrada Manizales, en el río Chinchiná, y más al sur en las quebradas Peñitas y Termales

Naranjo y Ríos [76], definen Lava de Tesorito como dos pequeños cuerpos hipoabisales que forman grandes domos al sureste de Manizales, cerca al Barrio La Enea. Los dos domos forman parte del cráter de un volcán dormido en la actualidad. El domo más occidental presenta la morfología típica de un domo colada, mientras que el otro es un domo simple. Este último se caracteriza por el empaquetamiento espectacular de los pórfidos andesítico basálticas columnares que lo forman.

Aristizábal y Echeverri [77], concluyen que el único depósito de origen volcánico asociado al Volcán Tesorito es un flujo de lava andesítica de pequeña extensión, emplazado por volcanismo tipo fisural, que presenta una morfología cómica y es generado a partir de los esfuerzos distensivos regionales asociados al Sistema Villamaría-Termales.

Naranjo y Ríos [76], caracterizan el Domo Sancancio como un criptodomo producto de la inyección de magma basáltico a lo largo de la fractura de la falla Manizales-Villamaría. Se encuentra intruyendo el Complejo Quebradagrande, Formación Manizales y Formación Casabianca. Litológicamente corresponde a un basalto hipersténico, presentándose en empaquetamientos columnares. Este cuerpo fue datado obteniéndose una edad de 1.2 ± 0.08 m.a.

La litología local que aflora en el municipio de Chinchiná, se define como rocas ígneas básicas a ultra básicas de afinidad oceánica que van desde basaltos, gabros a rocas piroxénicas, altamente deformadas y que específicamente en Cenicafe se definen como Anfibolitas (Complejo Arquia). Según Naranjo y Ríos [76], corresponden a los gabros piroxénicos de Chinchiná; en la región el sistema de fallas Cauca-Romeral, controla los contactos con las sedimentitas de la formación Quebradagrande, los cuales forman un cinturón alargado en dirección N-S. En sección delgada la plagioclasa está totalmente sausuritizada y el tamaño de grano es variable entre fino y grueso. Los cristales presentan huellas de deformaciones mecánicas frías manifestada por la rotura de éstos, sobre todo

en las zonas de contacto con las rocas sedimentarias. El anfíbol es de color verde-azulado con pleocroísmo fuerte y birrefringencia amarilla. El piroxeno es incoloro con fuerte pleocroísmo amarillo, azul, rojo y birrefringencia amarilla o gris. Los gabros piroxénicos presentan alteración, además de la sausrutización de las plagioclasas y serpentización de los máficos.

La forma de presentación, composición, textura y relaciones estructurales de esta roca, con las rocas circundantes, representan escamas tectónicas emplazadas en las rocas del terreno Cauca-Romeral. Naranjo [71], las denomina como el cinturón de gabros de Pereira–Santa Rosa, y los define como un cinturón de rocas gabróicas de estructura isotrópica, fanerítica e hipidiomórfica de grano medio, compuestos principalmente por hornblenda y plagioclasa cálcica sausrutizada. Se le considera de edad cretácica debido a su relación con las unidades adyacentes. Este cuerpo es también denominado por Idárraga y Martínez [78], como el stock metagabroico de Chinchiná-Santa Rosa. En la zona de estudio estas rocas se encuentran en un alto grado de trituración y un avanzado estado de meteorización.

Con respecto a lo anterior se tiene que para el área de estudio aguas arriba del río Chinchiná las litologías antes descritas representan un porcentaje, el cual es significativo determinarlo ya que es de utilidad para realizar comparaciones con la cantidad de material de arrastre encontrado, en este sentido se determina un porcentaje para cada litología, donde rocas asociadas al Complejo Quebradagrande poseen un 25% del área total, el Complejo Arquía un 15%, el complejo Cajamarca un 25%, el cinturón gabróico Chinchiná – Santa Rosa un 5% y un 30% para todas las litologías asociadas al Complejo Volcánico Ruiz – Tolima – Cerro Bravo.

Si bien muchas de las litologías antes descritas se encuentran de forma distal con respecto al área de estudio, se tiene que tener en cuenta que, esta lejanía en relación con el tipo de roca puede determinar la cantidad de material que proporciona los afluentes en la zona, es decir, si aguas arriba se presenta de forma abundante material que puede erosionarse muy fácil por el tipo de génesis de este, puede que aguas abajo estas litologías no tenga tanta relevancia ya que han sufrido un transporte considerable que a ocasionado el

desgaste de este material, lo contrario ocurriría para litologías con alto grado de resistencia.

En la figura 1-2 se puede observar la cartografía básica de la cuenca y en la figura 1-3 se puede detallar la disposición regional de las rocas anteriormente descritas.

1.3.2 Aproximación a la definición de rocas según su clasificación en la construcción

De acuerdo con Maya [79], no se recomienda utilizar la descripción composicional de la roca parental o roca madre (de procedencia), para clasificar los pétreos de acuerdo para su uso específico en la construcción, según los parámetros de las normas internacionales y nacionales ASTM y NTC respectivamente. De otro modo “Los depósitos de material de arrastre son el resultado de la concentración natural por proceso fluviales meteorizantes que desintegran fragmentos y partículas minerales de las rocas del basamento, sometidas posteriormente por las corrientes fluviales a procesos de transporte, abrasión y sedimentación” Olarte [80]. Este planteamiento está basado en la racionalidad y modernización para la adecuada clasificación de los materiales de arrastre, sin embargo, la propuesta se da para definir la necesidad de clasificar los materiales en sus condiciones naturales de sedimentación.

Esta definición de los pétreos de río nos permite entender mejor la forma de clasificación apropiada para determinar las propiedades y cualidades que poseen para su uso en la construcción. Se propone como metodología para una manera pragmática en la clasificación que se hace a partir de los ensayos, en su composición mineralógica y propiedades físicas y químicas en laboratorio. Olarte [80], propone unas definiciones importantes para dicha clasificación. Las define del siguiente modo, geológicamente, la procedencia de los materiales pétreos en general se da por tres procesos típicos: erosión, transporte y depositación. Con factores determinantes de composición de la hidrocuenca en la que se extraen los minerales. Éstos son:

- Gradiente de la corriente (pendiente de la superficie del agua) que influye en la velocidad.
- Caudal y regularidad (entiéndase caudal como agua y sedimentos en m³/s).
- Forma y regularidad de la sección transversal del cauce.
- Profundidad y amplitud del cauce, área de la sección transversal y perímetro mojado.
- Dirección o alineamiento del canal.
- Resistencia de las paredes y fondo del cauce, su aspereza y rugosidad.
- Carga de sedimentos que recibe la corriente.
- Competencia y capacidad de la corriente.

Entendida la hidrodinámica fluvial es importante tener presente las características de los fragmentos y partículas minerales en sus condiciones físicas que determinan su capacidad de concentración mecánica, como lo son: resistencia a la meteorización, resistencia a la abrasión durante el transporte y peso específico alto. En este sentido se entiende los procesos generadores de depósitos de material de arrastre la erosión, transporte y deposición.

Según la ASTM C33 [81] se especifica las propiedades físicas, químicas y mecánicas que deben poseer los materiales pétreos idealmente, y en las condiciones que se deben utilizar las técnicas descritas por la misma de acuerdo a los objetivos que se propone para su uso y aplicación. Se desarrollan los puntos con mayor interés para este objetivo. Esta norma brinda la información suficiente sobre las especificaciones que se requieren para la preparación de concretos, establece también los requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos (se exceptúan los livianos y pesados); por último, determina la variación que pueden poseer los mismos en gradación y calidad según las zonas de procedencia, lo que indica la posibilidad de asegurar materiales satisfactorios para su uso en la mayoría de concretos.

1.3.3 Clasificación de las rocas

Tipológicamente las rocas se clasifican en tres grandes grupos, que son las ígneas, sedimentarias y metamórficas. Sin embargo, según distintos factores endógenos y exógenos de la formación y dinámica de la tierra, se dan transformaciones de las rocas pasando de un estado específico a otro [82].

1.3.3.1 Rocas ígneas

Las rocas ígneas son aquellas formadas por la solidificación del magma, estos pueden ser cristalinas si se solidifica el magma a más de 2.5 km de profundidad o puede ser de vidrio y cristales en su interior si se solidifica en o cerca de la superficie externa de la corteza terrestre (comunicación verbal Eugenio Duque Escobar). En su génesis intervienen, entonces, los procesos de fusión parcial que originan el material fundido, así como los procesos de cristalización. Como las rocas sedimentarias, las rocas ígneas tienen su

desarrollo en distintos ambientes caracterizados por temperaturas, presiones y composiciones químicas específicas [83].

1.3.3.2 Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias son formadas sobre la superficie de la Tierra por materiales acarreados por la gravedad, y transportadas por algún fluido (aire o agua) o bien precipitados de soluciones acuosas o por seres vivos. En todos estos casos la gravedad juega un papel importante. Por este motivo, las rocas sedimentarias, suelen acumularse en depresiones sobre la superficie terrestre a las cuales denominamos cuencas, allí por procesos de diagénesis se litifican formando estas rocas [84].

1.3.3.3 Rocas metamórficas

Se forman por procesos de cambio textural y/o mineral de rocas pre-existentes. Estos se forman debido a cambios en las condiciones de presión y temperatura en las cuales se encuentran las rocas. Las rocas metamórficas frecuentemente se desarrollan en ambientes donde la presión no es igual en todas las direcciones. Al contrario, la norma es que la presión sea dirigida, lo cual causa que las rocas sean acortadas en unas direcciones y alargadas en otras [85]. Los cambios en presión requieren además de la presión de sepultura, donde las fuerzas tectono-orogénicas son asociadas principalmente a subducción.

1.4 Calidad del Concreto

En la actualidad la calidad del concreto se ve reflejada en la durabilidad que tenga la mezcla, puesto que proporciona una aproximación a la durabilidad de la estructura conformada por concreto. La durabilidad es controlada por medio de la composición del concreto, las propiedades y la composición de los componentes del concreto, los procedimientos de mezclado y compactación, el curado y a veces la resistencia a la compresión del concreto. Este enfoque con frecuencia produce resultados insatisfactorios y es un objetivo común de investigadores e ingenieros desarrollar criterios de desempeño

que permitan estimaciones más confiables de la potencial durabilidad de una determinada mezcla de concreto y de la probable durabilidad de una estructura de concreto [86].

En gran cantidad de normas y códigos la resistencia a la compresión es un criterio para realizar un diseño de mezcla. Este parámetro puede dar una estimación de la calidad del concreto, con la resistencia a la carbonatación, pero realmente no es un criterio válido. Un concreto durable siempre será resistente, mientras que un concreto resistente no tiene que ser durable. Una de las razones por las cuales no es válido tener en cuenta este parámetro como un criterio para evaluar la calidad del concreto es debido a que la resistencia a compresión estándar de un cubo o cilindro de concreto constituye el valor medio de una propiedad de la sección transversal del concreto, mientras que la durabilidad, y por ende la calidad del material, está ligada a las propiedades tanto internas o externas que afecten al concreto. Se pueden obtener mejores correlaciones entre la durabilidad la resistencia siempre y cuando se utilicen las resistencias del concreto al final del curado ya que puede aproximarse a la calidad del concreto en edades posteriores [87].

1.4.1 Causas de durabilidades insuficientes

El concreto como material muestra todas las complicaciones y “enfermedades” que tiene mediante “síntomas” en la estructura de este mismo. Esta sintomatología variada que puede presentar el concreto se debe a las insuficiencias en la durabilidad de este material. La insuficiencia en la durabilidad del concreto se asocia principalmente a tres causantes: de tipo físico, de tipo mecánico y de tipo químico. El desgaste mecánico es causado a partir del impacto, abrasión, erosión o cavitación. Las causas físicas de la deterioración pueden ser por efectos de alta temperatura, cambios en la expansión térmica del agregado y a partir de la pasta del cemento endurecido. Los daños producidos por reacciones químicas dentro y fuera del concreto se pueden diferenciar en dos tipos: reacciones internas y reacciones externas; las reacciones internas se producen dentro del concreto y generalmente son producidas por los componentes que poseen los agregados y los componentes del cemento, siendo estas la reacción Alcalí-sílice, Alcalí-agregados y Alcalí-carbonatos. Los ataques químicos externos usualmente lo efectúan iones agresivos como: cloruros, sulfatos o dióxido de carbono, así como muchos líquidos o gases de origen industrial o natural [88, 89].

1.4.1.1 Permeabilidad

Para facilitar la comprensión de los factores que influyen en la durabilidad es necesario entender los fenómenos de transporte que ocurren en el concreto. Los fenómenos de transporte dentro del concreto se asocian al transporte de los fluidos que contiene y sus procesos de adsorción y difusión de iones dentro de los poros. Este proceso generalmente se denomina permeabilidad. La permeabilidad es altamente influenciada por el sistema de poros que tiene la pasta de cemento curada y su interface con los agregados. La zona interfacial generalmente ocupa una tercera parte del volumen de la pasta de cemento curado en el concreto y se conoce por tener una microestructura diferente de la masa de la pasta de cemento curado. La zona interfacial es además el lugar de los primeros microfisuramientos. Por estas razones la zona interfacial contribuye significativamente en la permeabilidad del concreto. La porosidad es la medida de la proporción del volumen total del concreto ocupado por los poros y usualmente se expresa en porcentaje [2, 90].

Los poros relevantes en la permeabilidad son los que al menos tengan un diámetro de 120 o 160 nm, éstos poros tienen que ser continuos. Los poros que son ineficaces con respecto al flujo, es decir, a la permeabilidad, se caracterizan por ser discontinuos, que contengan agua adsorbida o tengan una ruta de ingreso angosta, incluso si los poros son en sí son más grandes [91].

Los agregados también pueden contener poros, pero generalmente son discontinuos, además la superficie de las partículas de los agregados es cubierta por la pasta del cemento, lo que conlleva a que los agregados no contribuyan a grandes rasgos en la permeabilidad del concreto [92].

Los procesos de transporte dentro del concreto hacen referencia a tres tipos de mecanismos [2,18]:

- Permeabilidad, siendo un flujo guiado por la diferencia entre las presiones.
- Difusión, el cual genera movimiento del fluido por diferencias entre las concentraciones. Este proceso se caracteriza por la difusividad, propiedad que relaciona la difusión de una sustancia en otra. Generalmente los gases se pueden difundir en el aire

circundante o en medio acuoso, pero en el primer caso el proceso se demora 10^4 a 10^5 veces menos que en el segundo.

- Sorción, este proceso es el resultado del movimiento del fluido hasta el poro por capilaridad.

Siendo la permeabilidad un proceso de transporte, la permeabilidad al agua en el concreto no es una simple función de la porosidad, pero si depende del tamaño, distribución, forma, dificultad y continuidad de los poros. Adicionalmente, la permeabilidad de la pasta de cemento curado es controlada por la capilaridad porosa.

Entonces, de este modo, aumenta la importancia en los procesos de difusión ya que, por ejemplo, la humedad relativa induce un proceso de movimiento en el flujo de vapor a través del concreto debido a un cambio diferencial entre sus porcentajes. La transmisión de vapor de agua del concreto generalmente afecta de manera similar a la permeabilidad al aire del concreto. Además, la difusión de gases, iones de carácter agresivo, como lo son los cloruros y los sulfatos, se mueven por difusión a través del poro hidratado. En este poro hidratado es donde forman reacciones con la pasta de cemento hidratado y toma lugar la difusión iónica. La difusión iónica es más efectiva cuando los poros del cemento curado están saturados [2, 14].

Tanto la permeabilidad como los procesos de difusión son bajos en concretos de baja relación W/MC, pero la influencia de esta relación en la difusión es menor que en la permeabilidad, esto debido a que la permeabilidad varía con el progreso en la hidratación.

La diferencia entre la permeabilidad de la pasta de cemento y el concreto que contiene esa pasta de cemento con la misma relación W/CM, es apreciada por la permeabilidad de los agregados, ya que éstos, como anteriormente se había comentado, afectan el comportamiento del concreto. Si el agregado tiene una permeabilidad muy baja, su presencia disminuye el área efectiva en la que el fluido tiene lugar, dificultando la ruta de difusión del fluido debido al efecto del agregado, el cual reduce la permeabilidad considerablemente. Sin embargo, como el concreto tiene pasta de cemento curado que envuelve las partículas de agregados, la permeabilidad del concreto finalmente es altamente influenciada por la permeabilidad de la pasta de cemento que recubre todas las partículas [2, 14, 18].

1.4.1.2 Absorción

La facilidad de un fluido para ingresar en el espacio poroso de un concreto es medida por absorción. La absorción usualmente se mide mediante el cambio en el peso de la muestra, empleando el secado hasta peso constante después de haberla sumergido en agua. Se pueden emplear varias formas para realizar este ensayo encontrándose diferencias entre cada uno, este fenómeno se debe al tipo de secado empleado, ya que a temperaturas bajas puede no remover eficientemente el agua, mientras que a mayores temperaturas puede que remueva tanto el agua absorbida como la estructural [2].

De acuerdo con esto la absorción no puede ser una medida que cuantifique la calidad del concreto, sin embargo, la mayoría de buenos concretos tienen absorciones inferiores al 10% en masa. La norma que describe el test a seguir para determinar la absorción es la ASTM C642-06 [93]. Los ensayos de absorción no son usados frecuentemente, se usan para realizar rutinas de control de la calidad.

1.4.2 Ataques ácidos

El concreto generalmente es resistente a los ataques químicos, aunque tiene sus excepciones, primero, el concreto contiene cemento tipo Portland, el cual es altamente alcalino y por ende no es resistente a ataques con ácidos fuertes o compuestos de carácter ácido. Por tanto, cuando esta reacción suceda, a menos que se proteja el concreto este no debe de implementarse.

Generalizando, el ataque químico al concreto ocurre cuando hay presencia de componentes intermediarios ácidos de una reacción de hidrolisis por hidratación. De acuerdo con lo anterior, si el producto de la reacción es soluble este se puede lixiviar, pero si este es insoluble puede ser perjudicial para el concreto [94].

De este ataque químico los componentes más vulnerables del cemento hidratado es $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pero C-S-H también puede verse afectado. Los agregados calcáreos tienen poca resistencia ante estos ataques químicos. En la tabla 1-4 se puede observar otros compuestos que comúnmente atacan al concreto.

Tabla 1-4: Lista de algunos compuestos causantes del ataque químico al concreto [95].

Compuestos	Ácidos	
	Inorgánicos	Orgánicos
Cloruro de Aluminio	Carbónico	Acético
Sales de amonio	Clorhídrico	Cítrico
Sulfuro de hidrógeno	Fluorhídrico	Fórmico
Grasas vegetales y animales	Nítrico	Húmico
Aceite vegetal	Fosfórico	Láctico
Sulfatos	Sulfúrico	Tánico

El concreto puede verse afectado por soluciones con pH inferior de 6,5, ataques severos con soluciones de pH menores a 5,5, y para soluciones con pH por debajo de 4,5 el ataque es bastante agresivo, por ejemplo, concentraciones en el medio entre 30 y 60 ppm de CO₂ causa grave ataque al material, después de 60 ppm ocasiona un ataque químico muy agresivo [96].

El ataque químico tiene una velocidad progresiva, dada por la función de penetración de la primera ley de Fick, siendo la velocidad proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. El ataque no solo es debido al cambio de pH, es altamente influenciado por los iones agresivos que este transporte hasta el poro. En un momento dado, la velocidad del ataque químico disminuye, este momento es debido al ataque químico hecho anteriormente. Parte de la disolución y lixiviación del producto de la reacción de hidrolisis con la fase mineral portlandita ayuda a que el agregado sea expuesto disminuyendo tanto la superficie vulnerable al ataque y la velocidad a la que difunden los iones debido al cambio de la pasta de cemento curado pasando a la penetración dentro del agregado [18].

La lluvia ácida consiste en diferentes intermediarios ácidos con un pH de 4,0-4,5, la cual puede causar desgaste al concreto expuesto a esta [97].

Un ataque que en sí no es grave es debido a las aguas residuales. Las aguas residuales a altas temperaturas, generalmente, reportan que los compuestos de sulfuros son reducidos por medio del metabolismo anaeróbico de una bacteria, convirtiendo los compuestos de sulfuro a H₂S. Por sí mismo, las aguas residuales ni el H₂S es destructivo

para el compuesto, pero suelen generarse reacciones de oxidación intermediado por el metabolismo aeróbico de una bacteria, obteniéndose ácido sulfúrico. Progresivamente la pasta de cemento curado se va disolviendo generando un deterioro agresivo en el concreto [2, 98, 99].

El ataque químico debido a la presencia de ácido sulfúrico en el concreto es particularmente agresivo, ya que el ataque de carácter ácido se focaliza tanto en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como en C-S-H, además que por parte del ataque por sulfatos hacia la fase de aluminatos. El concreto generalmente es resistente ante ataques microbiológicos debido a su alto pH lo cual hace de él un lugar poco agradable para los microorganismos, sin embargo, en condiciones tropicales unas algas, bacterias o hongos pueden producir ácido nítrico a partir de nitrógeno atmosférico [2, 100].

Los ensayos fisicoquímicos realizados para identificar un ataque químico no están del todo estandarizados, ya que la medición por parte del pH no es un indicador adecuado para evaluar el potencial del ataque debido a la influencia por parte de la carbonatación que pueda presentar el concreto.

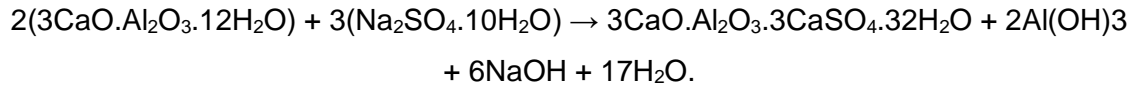
1.4.2.1 Sulfatación del concreto

Las sales sólidas no atacan el concreto, pero cuando está en solución puede reaccionar con la pasta de cemento hidratada, particularmente sulfatos de calcio, magnesio, potasio y sodio producidos en el suelo o en las aguas subterráneas. Ya que el sulfato de calcio es de baja solubilidad, las aguas subterráneas contienen grandes concentraciones de sulfatos no solo cálcicos. Los sulfatos en las aguas subterráneas son usualmente de origen natural, pero pueden proceder también de fertilizadores o desde efluentes industriales. Las reacciones de varios sulfatos con la pasta de cemento curado son [2, 16, 101]:

- Sulfato de sodio: ataca al $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Es un ataque de carácter ácido el cual puede hacer lixiviar la fase mineral $\text{Ca}(\text{OH})_2$ completamente, pero si el NaOH es acumulado, el equilibrio es alcanzado y solo un poco de SO_3 es depositado al yeso.



- Sulfato de sodio: ataca al $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. El sulfato de calcio ataca solamente al aluminato cálcico hidratado formando sulfoaluminato de calcio, conocido comúnmente como etringita.



- Sulfato de magnesio: ataca al $\text{Ca}(\text{OH})_2$. El sulfato de magnesio ataca a los silicatos cálcicos hidratados, así como $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y los aluminatos cálcicos hidratados. Como el $\text{Mg}(\text{OH})_2$ tiene baja solubilidad la reacción procede hasta completarse, siendo de los ataques más graves que puede afectar el concreto. La consecuencia crítica del ataque por sulfato de magnesio es la destrucción de C-S-H.



1.5 Reacción álcali-agregado

La reacción álcali-agregado es una reacción expansiva entre los álcalis en la solución porosa de hormigón y minerales en los agregados, bajo condiciones de humedad. Según la literatura hay básicamente dos tipos de reacciones que destruyen desde adentro hacia afuera al concreto. La reacción de álcali-sílice [102] y la reacción de alcalicarbonato [103, 104]. Sus nombres se derivan de la composición de la roca involucrada en la reacción, las manifestaciones microestructurales y externas son algo diferentes.

1.5.1 Potencial reactividad álcali-sílice

Los agregados que contienen ciertos tipos de sílices o carbonatos pueden reaccionar con los álcalis presentes en el cemento Portland (óxido de sodio y de potasio). El efecto de esta posible reacción es el agrietamiento y la fracturación del concreto. Esta reacción es más evidente cuando el concreto está sometido a un ambiente húmedo constantemente.

En la naturaleza se encuentran rocas que contienen una variedad de minerales del grupo de sílice, donde la sílice suele tener diferentes estados termodinámicos. El primer grupo de rocas se compone de especies vítreas o amorfas; El vidrio volcánico y el ópalo son dos

ejemplos típicos, que reaccionan rápidamente con efectos deletéreos alrededor de un año después de la construcción de la estructura, pero este período también depende de las condiciones ambientales. El segundo grupo de rocas incluye rocas cristalinas. Estas rocas han sufrido deformaciones y cambios térmicos significativos debido a una serie de procesos tectónicos que actúan durante la evolución de la corteza terrestre. Uno de los minerales constituyentes, cuarzo, se puede encontrar en un estado tenso y / o deformado. Este grupo muestra una reacción lenta o tardía con efectos deletéreos expansivos que se pueden ver después de muchos años, de 6 a 10, o incluso en edades posteriores. En ambos casos la reacción muestra un comportamiento típico, el agregado es atacado por la solución de poro de hormigón que contiene iones OH^- , K^+ , Na^+ y Ca^{2+} [105].

La reacción comienza con el ataque a los minerales silíceos en el agregado por los hidróxidos alcalinos en el agua porosa derivada de los álcalis (Na_2O y K_2O) en el cemento. La reacción tiene lugar cuando están presentes los álcalis en cantidades que sobrepasan el 0,60% en peso en el concreto, y cuando los agregados contienen cantidades significativas de sustancias reactivas como ópalo, calcedonia, tridimita, heulandita, zeolita, cristobalita, también algunas filitas, dacitas, pórfidos andesíticos y algunas riolitas, entre otras. Se cree que el deterioro expansivo, es causado por el hinchamiento osmótico de los geles alcalinos de sílice producidos por la reacción química entre el material silíceo reactivo y los álcalis liberados por la hidratación del cemento y de otras fuentes [106].

Debido a que el agua es esencial para que la reacción álcali-sílice continúe, el secado del hormigón y la prevención del contacto futuro con el agua es un medio efectivo para detener la reacción; Es, de hecho, el único medio. Por el contrario, el mojado y el secado alternado agravan la migración de los iones alcalinos, que se mueven desde la parte húmeda a la más seca del hormigón. Un gradiente de humedad tiene un efecto similar [107].

La reactividad real del agregado se ve afectada por su tamaño de partícula y porosidad, que influyen en el área sobre la que puede tener lugar la reacción. Cuando los álcalis provienen únicamente del cemento, su concentración en la superficie reactiva del agregado se regirá por la magnitud de esta superficie. Dentro de los límites, la expansión del hormigón con un agregado reactivo dado es mayor cuanto mayor sea el contenido en álcali del cemento y, para un contenido de álcali dado en el cemento, mayor será su finura [108]

Otros factores que influyen en el progreso de la reacción del álcali-agregado incluyen la permeabilidad de la pasta de cemento hidratada porque controla el movimiento del agua y de los diversos iones, así como del gel de sílice. En particular, el gel puede cambiar su constitución por absorción y, por lo tanto, ejercer una presión considerable mientras que, en otros momentos, la difusión del gel fuera del área confinada tiene lugar [108]

1.5.1.1 Mecanismos de expansión

Dependiendo de la estructura del agregado, su porosidad y tamaño, los geles de álcali-sílice de composición química variable, son formados en la presencia de iones de hidroxilo y de metal alcalino. La forma como ataca el concreto, incluye la despolimerización o rompimiento de la estructura de la sílice del agregado por medio de los iones de hidroxilo, seguido de la absorción de los iones de metal alcalino en la superficie recientemente creada de los productos de la reacción [109].

La solubilidad de los geles de silicato alcalino en el agua es la responsable de su movilidad desde el interior del agregado hacia las regiones agrietadas, tanto dentro del agregado como en el concreto. La continua presencia de agua en el concreto causa un agrandamiento y extensión de las microgrietas, que finalmente alcanzan la superficie exterior del concreto. Se cree que la formación de gel tiene lugar sólo en presencia de iones Ca^{2+} . La presencia del sodio y potasio en la estructura del concreto generará esta reacción con las sílices de los agregados, lo que creará geles silicatos alcalinos en el agua potenciando su absorción por ósmosis. Esta presión hidráulica conduce a la expansión y agrietamiento de la estructura del concreto [110].

Finalmente, existen 3 fases del agrietamiento del concreto; el primero consiste en que la parte superficial pierde humedad, por lo que se da una suave retracción por secado, dándose una ligera contracción de secado en la superficie bajo condiciones de humedad relativa; la segunda fase se da cuando la reacción álcali agregado más la formación de gel, puede originar reducción inicial de volumen, con humedad interna expansiva, bajo condiciones de humedad relativa media; finalmente la última fase opera cuando la reacción álcali-agregado continúa hasta que la sílice se termine, el pH se reduzca y haya suficiente secado superficial, mientras la humedad interior expansiva actúa [111].

1.5.1.2 Reactividad de los agregados del concreto

En el caso de agregados provenientes de fuentes nuevas o cuando los registros de servicio indican que los agregados son potencialmente reactivos se deberían realizar ensayos en laboratorio. Los ensayos en laboratorio de mayor utilidad son los siguientes: por análisis petrográfico se puede deducir que los componentes reactivos de los agregados perjudiciales varían en su composición mineralógica, y se han descrito procedimientos para reconocer éstos componentes. Se pueden obtener recomendaciones acerca de las cantidades aceptables de minerales reactivos, determinadas mediante análisis petrográficos [110].

Estos procedimientos se aplican principalmente para los componentes reactivos más estudiados y en consecuencia mejor conocidos. Las rocas y minerales reactivos que se han encontrado con mayor frecuencia durante los últimos años parecen tener mayores proporciones pésimas y son más difíciles de reconocer mediante análisis petrográficos. El cuarzo altamente deformado con lamelas de deformación parece ser característico de las rocas que contienen cuarzo reactivo. Las micas de grano relativamente grueso también han sido consideradas componentes reactivos [111]; las micas de grano fino son reactivas en las argilitas [112].

El concepto de proporción pésima parece no aplicarse en el caso de los agregados gruesos reactivos, ya que su reactividad puede ser parcial. En general, este concepto es difícil de aplicar en la práctica de la ingeniería debido a que no es posible monitorear la composición mineral de los agregados compuestos por rocas mixtas de forma práctica y económica, y también porque los efectos del tamaño de las partículas y la concentración de álcalis son parámetros determinantes inseparables.

La norma NTC 3828 (Ensayo de la barra de mortero para determinar la reactividad potencial) Este método es el más utilizado para indicar el potencial de reactividad frente a los álcalis. El Apéndice de la norma ASTM C 33 indica los criterios de aceptación que se utilizan para evaluar los resultados de los ensayos realizados conforme a la norma. Este procedimiento es útil no sólo para evaluar los agregados, sino también para evaluar combinaciones particulares de cementos y agregados. Es necesario cuidar que las barras nunca pierdan humedad.

Estudios sugieren que el ensayo de la barra de mortero no siempre puede garantizar una correcta determinación de la reactividad expansiva de los agregados en el hormigón en obra [113]. Diferentes laboratorios de numerosos países han desarrollado diferentes variaciones del método NTC 3828, todos ellos intentando inducir resultados significativos más rápidamente, en particular para los agregados que son lentamente reactivos.

El método NTC 175 (Ensayo químico para determinar la reactividad potencial). Este método se utiliza principalmente para realizar evaluaciones rápidas, ya que permite obtener resultados en pocos días y no en tres a doce meses como el ensayo de la barra de mortero antes descrito. Sin embargo, hay que tener mucho cuidado al interpretar los resultados de este ensayo.

El Apéndice de la norma ASTM C 33 indica criterios para interpretar éstos resultados. Algunas de las rocas reactivas estudiadas más recientemente caen en una región que se encuentra por debajo del extremo de la curva (NTC 175), de modo que los resultados no se pueden interpretar fácilmente aplicando los criterios contenidos en la norma. En realidad, el ensayo mide la reactividad puzolánica del agregado aproximadamente a la temperatura máxima que alcanzan la mayoría de los hormigones durante la fase de curado inicial. Enfatiza la identidad esencial de la reacción álcali-sílice y la reacción puzolánica. Los resultados obtenidos con este método de ensayo son cuestionables cuando se lo utiliza para evaluar agregados livianos, ya que no está recomendado para este tipo de agregados.

2. Aclaraciones

En el tercer objetivo el cual pretendía analizar los materiales de las diferentes microcuencas de los afluentes del río antes de la zona media (antes de que la quebrada el Rosario tribute), no se realizó por varios motivos:

- Económicamente no es importante pues los títulos (contratos) de concesión minera actuales están ubicados después de la zona donde ya el río ha recibido los afluentes que eran parte del objetivo, por lo tanto, los resultados serían parciales y la producción industrializada y concesionada de los materiales triturados se efectúa del el título 606-17 aguas abajo.
- La cantidad de microcuencas que posee la cuenca del río Chinchiná es significativa (>30), por lo que dificultaría en gran medida determinar los materiales pétreos para cada una, si bien esto podría ser un trabajo complementario del actual.
- Aguas arriba de los sitios donde se recolectaron las muestras, existen explotaciones del río no mecanizadas y en su mayoría explotaciones denominadas de hecho ilegales las cuales en cualquier momento pueden ser eliminadas; además por el hecho de no ser mecanizadas el tipo de material que se usa para la producción de concreto en mayor escala no es representativo ni es utilizado para concretos de alta resistencia.
- Lo ideal es no solo realizar estudios sobre zonas de minería ilegal sino además garantizar que los resultados obtenidos sean acordes a la problemática actual de la protección del medioambiente trabajando siempre en zonas que tengan acompañamiento y supervisión de los entes responsables de ello (Ministerio de Minas y Corporaciones Regionales).
- Se considera que para conocer más a fondo la capacidad de suministro de materiales del río para la producción de concretos es necesario estudiar los materiales finos que este posee y esto será objeto de otra investigación que se realizará más adelante.

3. Materiales y métodos

La metodología de la tesis se llevó a cabo con respecto a los objetivos impartidos en el trabajo, por lo cual se dividirá en tres fases. La primera es la caracterización de los agregados extraídos, la segunda abarca el aporte de los agregados en concreto estructural y la última es el establecimiento de la zona óptima de recolección de agregados a partir de sus propiedades y características como material utilizado en la producción de concretos estructurales

3.1 Evaluar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los agregados triturados extraídos de la zona media del río Chinchiná

Este objetivo busca establecer los parámetros de calidad de los agregados extraídos de la fuente y su caracterización para encontrar así las propiedades que éstos materiales tienen, ampliando así el conocimiento acerca de estos materiales y su empleo en matrices cementicias.

3.1.1 Obtención de los agregados

La obtención de los agregados por trituración provenientes del río Chinchiná se realiza en tres fases, la primera es la identificación y recolección de material para muestreo clasificándolo por diámetro de la roca, la segunda es la trituración del material, y por último se procede a realizar la clasificación de los agregados triturados diferenciando el tipo de roca.

3.1.1.1 Recolección de material

Se realizó una recolección del material proveniente de la fuente del río Chinchiná. Las muestras fueron obtenidas de dos distintas procedencias: al lado del puente Domenico

Parma en el predio denominado la PIEDRA que hace parte del título de concesión minera 606-17, y el otro lugar de extracción fue aguas abajo en el predio denominado LOS POTREROS que hace parte del título de concesión minera 795-17.

Las muestras fueron tomadas aleatoriamente para generalizar las mediciones. El muestreo se realizó de acuerdo a dos metodologías diferentes para la generalización de las muestras. El primer muestreo que se realizó fue por parte de materiales naturales por retículo. Esta metodología consistió en seleccionar rocas de tamaño natural arrastradas por el río, que se tomaron de los agregados acumulados en la zona de extracción por medio de retroexcavadora que carga en volqueta tipo domo. El material tiene tamaños de distintos diámetros por proceso natural. En el lugar dispuesto para el almacenamiento de estos materiales se implementó un retículo de 1mt x 1mt y se tomaron las muestras como se indica en la figura 3-1.

Figura 3-1: Muestra de rocas naturales.



Paso siguiente a la selección de muestras se organizó un retículo de medidas iguales para tener un acercamiento subjetivo al tipo de roca macroscópicamente según se observa en la figura 3-2.

Figura 3-2: Clasificación macroscópica de rocas.



El segundo tipo de muestreo fue por los materiales triturados por volumen. En este caso las rocas son seleccionadas por medio de una pala de mano de montículos creados por la banda transportadora de la trituradora, como se puede observar en la figura 3-3.

Figura 3-3: Montículos de triturado de rocas.



De estas muestras se tomaron alrededor de 20 Kg en distintos lugares del montículo en cada visita al campo con muestras que oscilaban en tamaño entre 2 y 3 cm.

Las áreas de los lugares de extracción consisten en polígonos formados por las coordenadas donde se realizó la toma de muestras. Las coordenadas del polígono para el contrato 606-17 se pueden observar en la tabla 3-1, en la tabla 3-2 se observan las coordenadas del contrato 795-17.

Tabla 3-1: Coordenadas del título de concesión minera 606-17.

Coordenadas	
Norte	Este
1.044.716,000	1.164.213,000
1.044.599,001	1.164.296,999
1.044.211,002	1.164.238,999
1.044.157,002	1.164.019,998
1.044.100,000	1.163.965,996
1.044.133,000	1.163.921,996
1.044.173,003	1.163.949,999
1.044.302,005	1.164.180,002
1.044.594,006	1.164.223,002

Tabla 3-2: Coordenadas del título de concesión minera 795-17.

Coordenadas	
Norte	Este
1.049.000,00	1.164.180,00
1.049.000,00	1.163.900,00
1.047.560,00	1.163.100,00
1.047.000,00	1.163.100,00
1.047.000,00	1.163.510,00
1.048.000,00	1.163.650,00
1.048.430,00	1.164.000,00
1.049.000,00	1.164.180,00

Los sitios donde se encuentran los depósitos de rocas fueron registrados implementando una plantilla de 1mt x 1mt. Se identificaron los cantos de roca con tamaños mayores a 5 cm y se diferencian por tipo de roca. Las rocas con diámetros mayores a 60 cm fueron encontradas, por lo que fueron fracturados y depositados. Se clasificó las muestras por el tamaño de partícula, menores o iguales a 30 cm son muestras A1, mayores a 30 cm son muestras A2.

3.1.1.2 Trituración del material

Como se describió en el tópico anterior hay presencia de material que varía de tamaño desde muy finos hasta bloques de 30 cm de diámetro, como es el caso de A1 y material que supera este tamaño denominado A2. Las muestras de material A2 tuvieron que ser fraccionadas con un cargador Caterpillar. Para la trituración del material se tuvo una relación 1:1 de las muestras A1 y A2 para la obtención de dos tipos de materiales: el primer con un tamaño límite de 2,5 cm, y el segundo con materiales con un rango desde finos hasta arenas gruesas.

El material que sale como producto del triturado está compuesto por rocas de diferentes tipos, por lo que se toman 25 muestras de diferentes montículos de 20 Kg de material triturado, separándolas según el tipo de rocas.

3.1.2 Clasificación de los agregados

Para las rocas obtenidas tanto por muestreo de superficie como por volumen se realizó una serie de clasificaciones. Las clasificaciones de los agregados fueron hechas por parte de los tipos de rocas predominantes, tanto por contraste como por secciones delgadas.

3.1.2.1 Clasificación por contraste

La primera clasificación de los agregados realizada fue por parte del contraste. Esta consistió en determinar por volumen las rocas con mayor participación dentro de los grupos de rocas halladas. Estas rocas se depositan en cuadrantes de vidrio con medidas de 10x10x30 cm.

3.1.2.2 Clasificación por secciones delgadas

Las láminas delgadas o secciones delgadas son preparaciones que se realizan en rocas para su estudio con microscopio petrográfico, y que consisten en rodajas de la roca de un espesor de unas 30 μm que se adhieren a láminas de vidrio (portas) mediante resina epoxi, para posteriormente ser recubiertas por otra lámina de vidrio.

El objetivo de hacer una lámina delgada es el de conseguir un grosor de la roca muestreada tan pequeño que permita que la luz la atraviese. El microscopio petrográfico posee un polarizador que convierte la luz que emite en luz polarizada, un analizador, que es una lente que polariza la luz perpendicularmente al polarizador, y una platina que permite girar la lámina delgada. Cuando se observa una lámina delgada al microscopio, la luz atraviesa el polarizador y una vez polarizada atraviesa la lámina delgada y llega al analizador (si está activado) y luego al observador. Este procedimiento se hace del siguiente modo.

Las muestras para analizar son cortadas por una cortadora tipo ingleteadora de disco adiamantado, dejando las rocas en prismas rectangulares (tacos) con dimensiones aproximadas de 4x3x1 cm. Estas piezas se devastarán por una de sus caras utilizando polvo de carburo de silíceo, con texturas de grano entre grado 100 y 1000 y, mezclado con agua que actúa como lubricante, sobre cristales esmerilados. Sobre esta cara pulida se pega con resina especial (epoxy) una de las láminas de vidrios o porta, haciendo presión sobre este para que no deje burbujas o espacios de aire entre la pieza y la lámina. Se puede utilizar para este procedimiento una prensa hidráulica para ejercer mayor presión.

Antes de cortar nuevamente el taco o pieza por la cara contraria se debe roturar sobre el vidrio pegado la marca distintiva y, el sentido u orientación, de la pieza. Se hará un corte de 1mm de espesor entre el vidrio y la pieza. Luego mediante un porta-muestras que brindará la posibilidad de rectificación y reducción a 300 μm se monta en la rectificadora. Posteriormente se utiliza una devastadora eléctrica que reduce esta pieza hasta 30 μm . Esta reducción se puede hacer a mano utilizando carburo de silíceo sobre superficies completamente planas.

Las secciones delgadas realizadas a los diferentes tipos de rocas fueron analizadas por un microscopio óptico Nikon E200-LED con objetivos de x4, x10, x40 y x100

3.1.3 Caracterización mineralógica de los agregados

3.1.3.1 Microscopía de polarización

La investigación microscópica en luz transmitida o reflejada de minerales, rocas, menas y otros materiales técnicos y sintéticos es un método clásico y hasta hoy irremplazable para el estudio de éstos materiales. La microscopía de polarización es un método no destructivo y potente para la determinación de sustancias sólidas (cristalinas o amorfas), que posee relativamente elevada resolución espacial y además pueden ser estudiadas las relaciones texturales (estructura, fábrica, orientación preferencial, asociaciones de fases, texturas de reacción) obteniendo así importante información para comprender la génesis.

La identificación de los minerales con el microscopio de polarización se basa en las propiedades ópticas y morfológicas (Raith, Raase & Reinhardt, 2012). Se desarrolló un análisis a través de las siguientes observaciones con luz polarizada plana obtenida en laboratorio:

1. Para que los rayos de luz lleguen al objetivo situado sobre la platina del microscopio y éstos sean lo más paralelo posible se precisó:
 - a. Objetivos de bajo y medio aumento. El diafragma abierto. Color Pleocroísmo Forma Crucero Relieve.
 - b. Observaciones con luz polarizada plana y analizada. (Nicoles cruzados) Colores de interferencia Birrefringencia Extinción y Angulo de extinción Maclas.
 - c. Observaciones con nicoles cruzados y lente de Bertrand. Para precisar las observaciones se usó principalmente objetivo de grandes aumentos. Figura de interferencia signo Óptico.

3.1.3.2 Difractometría de rayos X (XRD)

Las muestras fueron analizadas en polvo, y los patrones de difracción de rayos X para los materiales evaluados fueron adquiridos en un equipo RIGAKU MINIFLEX II usando radiación de Cu K α a 30 kV y 15 mA con una velocidad de adquisición de 2 ° (min), una amplitud de muestreo de 0,02 ° (2 θ) y un rango de 3 ° a 70 ° (2 θ).

3.1.4 Caracterización física de los agregados

Los agregados fueron caracterizados físicamente obteniendo la absorción y realizando un análisis a la morfología de éstos a partir de imágenes tomadas después de la trituración. El procedimiento empleado para esta sección se describe seguidamente. Se realizó la absorción de los agregados gruesos para concreto estructural según la norma INV-E 223 del peso específico y absorción de agregados gruesos, realizada para cada una de las rocas predominantes en la muestra.

3.1.5 Caracterización mecánica de los agregados

La caracterización mecánica de los agregados fue realizada por el análisis granulométrico de los agregados, la resistencia al desgaste y la resistencia a compresión de éstos, el procedimiento para la realización de éstos ensayos se describe a continuación:

3.1.5.1 Granulometría de los agregados

Se realizó la granulometría de agregados gruesos para concreto estructural según el artículo 630-13 (norma INV-E 123-13), para cada una de las rocas predominantes en la muestra.

3.1.5.2 Resistencia al desgaste de los agregados

Se llevó a cabo el ensayo para evaluar la resistencia de los agregados por medio de la máquina de los Ángeles según la norma INV-E 128-13, para cada una de las rocas predominantes en la muestra.

3.1.5.3 Resistencia a compresión de los agregados

Se llevó a cabo el ensayo para evaluar la resistencia a compresión de los agregados según la norma INV-E 410-07, ensayo de compresión simple a roca, para cada una de las rocas predominantes en la muestra.

3.1.6 Caracterización química de los agregados

El procedimiento empleado para esta sección fue realizado según la norma INV-E 220-13 de la sanidad de los agregados a las soluciones de sulfatos de sodio o de magnesio, realizada para cada una de las rocas predominantes en la muestra.

3.2 Evaluar mediante pruebas mecánicas el aporte de los agregados seleccionados en la producción de concreto estructural.

Este objetivo indaga entre las propiedades mecánicas de los concretos estructurales implementando los agregados extraídos de la fuente, evaluando así el aporte de éstos materiales en la producción de concretos estructurales.

3.2.1 Diseño de mezcla

Se fabricaron concretos para cada una de las muestras por tipo de roca. Para la producción de éstos concretos se realizó un diseño de mezcla, para el cual se calcularon las granulometrías y desgastes, corroborando un tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ "a partir de la tabla 11.7 proporcionada por Sánchez de Guzmán [15], la cual es específicamente para materiales en forma angular, textura rugosa y concreto sin aire incluido. Se calculó la cantidad de agua para un asentamiento de 0 mm, siendo de 180 L.

Se calculó de la tabla 11.13, referenciada igualmente de Sánchez [15], tomando como resistencia esperada a los 28 días de 27,6 MPa, la cantidad de material cementante, siendo este Cemento Portland tipo I, conociendo que la relación W/CM está entre 0,59 y 0,45.

Para los agregados gruesos y finos se utilizaron las granulometrías de los materiales y la tabla 11.13 y gráfica 11.6 tomadas de Sánchez [15], obteniéndose para el agregado fino un porcentaje del 46% y para el agregado grueso el 54%. Estos porcentajes fueron tomados evaluando la manejabilidad del concreto.

De acuerdo con esto, el diseño de mezcla para éste concreto es 400 Kg de cemento Portland tipo I, 180 L de agua, 54% de agregado grueso y 46% de agregado fino.

Después de realizar el testeado de los concretos se modificó la cantidad de cemento y se mantuvo constante los otros componentes del concreto, evaluando así el consumo de cemento para la obtención de las resistencias esperadas.

3.2.2 Resistencia a compresión de cilindros de concreto

En un proyecto de construcción ingenieril debe tenerse presente la capacidad de resistencia a la que debe someterse el concreto, por lo cual la realización de pruebas en laboratorio de cilindros del concreto que se va a preparar es importante ejecutarlo en el transcurso del proyecto.

La resistencia característica del concreto en un proyecto de ingeniería establece por tanto el límite inferior de resistencia al que debe someterse éste, debiendo cumplirse que cada mezcla de concreto colocada tenga esa resistencia como mínimo. En la práctica, en la obra se realizan ensayos estadísticos de resistencias de los hormigones y el 95 % de los mismos debe ser superior a las planteadas en proyecto, considerándose que con el nivel actual de la tecnología del concreto una fracción defectuosa del 5 % es perfectamente aceptable. De acuerdo con lo anterior, la resistencia a la compresión de los cilindros de concretos fue testeados para cada tipo de roca encontrada en las muestras. El equipo implementado fue una Máquina Semiautomática Digital para Ensayos Marshall y CBR, y el ensayo fue llevado a cabo siguiendo la norma INV-E 410-13.

Se seleccionaron dos grupos de muestras a las que se realizaron pruebas de resistencia. El primer grupo al que se realizaron pruebas para determinar la resistencia a la compresión del concreto se realizó en tres distintas edades, para determinar su comportamiento en el tiempo. Por cada edad, se tomó un testigo para cada muestra, obteniendo así un promedio para cada una de las resistencias a los 28 días como se muestra en el siguiente acápite, por cada tipo de roca muestreada, para las primeras 3 muestras a las que se realizó el procedimiento. Para el segundo grupo de rocas a las que se practicó los análisis de resistencia se obtuvieron unos resultados muy cercanos a los valores que ofrecieron las primeras pruebas, lo que demuestra su constancia y tendencia en frecuencia y promedios obtenidos.

4. Resultados y discusión

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos y la discusión de éstos mismos con respecto a los objetivos planteados para la culminación de la tesis.

4.1 Evaluar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los agregados triturados extraídos de la zona media del río Chinchiná

4.1.1 Clasificación de los agregados

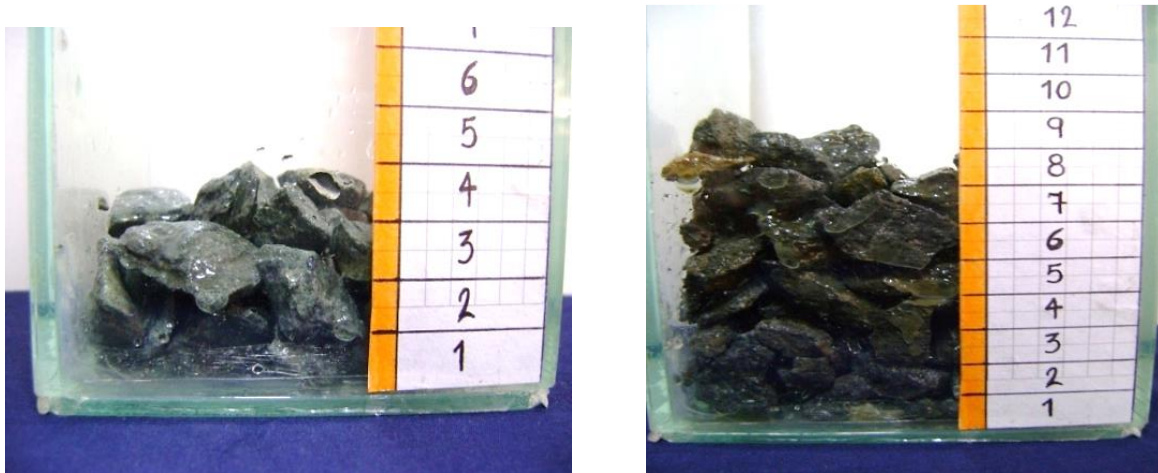
Los resultados de la clasificación de los agregados se presentan a continuación:

4.1.1.1 Clasificación por contraste

El análisis macroscópico por superficie de las muestras con la metodología del reticulado arrojó unos porcentajes promedio de 65% rocas Ígneas, un 25% de rocas metamórficas y un 10 % de sedimentarias, estos análisis se hicieron con tamaños de rocas que oscilaban entre 5cm y 15cm de diámetro.

De estos dos grupos se encontró por contraste unos porcentajes obtenidos por lavado y conteo de la clasificación manual, rocas predominantes dentro de ambos, lo que brindó mayor confianza en las rocas que serían tenidas en cuenta para desarrollar las secciones delgadas. Se tuvo presente la clasificación de acuerdo con la figura 4-1.

Figura 4-1: Clasificación de tipos de rocas por volumen.



El análisis de los materiales triturados para calcular los volúmenes arrojó resultados que involucran los tres tipos de rocas con porcentajes promedio de 78% rocas ígneas, un 20.5% de rocas metamórficas y un 1.5 % de rocas sedimentarias y las relaciones de cada roca en especial se muestran en la tabla 3-1.

Tabla 4-1: Porcentaje de rocas en el conteo del triturado.

Rocas Ígneas (%)		Rocas Metamórficas (%)		Rocas Sedimentarias (%)	
Pórfido Andesítico	50.0	Metabasitas	5.0	Lodolitas	0.2
Pórfido Dacítico	12.0	Esquistos Negros	3.5	Cherts	0.3
Granodioritas	5.0	Metagabros	3.0	Areniscas	0.5
Monzogranitos	2.0	Milonita	3.0	Brechas	0.5
Basaltos	5.0	Anfibolita	3.0		
Gabros	2.0	Migmatitas	1.0		
Tonalita	0.5	Gneis	1.5		
Tobas	0.5	Cuarcita	0.5		
Diabasas	0.5				
Dioritas	0.5				
Total	78.0		20.5		1.5

La variación en los porcentajes de los tipos de rocas obedece a que el triturado de manera aleatoria se mezclaba material de gran tamaño, y éstos en su mayoría son bloques de

material ígneo procedente de la cuenca del río claro, por lo que la procedencia de este material es de las actividades del complejo volcánico Nevado del Ruiz y también relacionados en menor proporción a rocas básicas y ultra básicas de afinidad oceánica.

4.1.1.2 Clasificación por secciones delgadas

Los análisis mineralógicos indican que las rocas ígneas tienen variaciones en cuarzo que van desde 35-50%, el feldespato potásico varía entre 20-80% y las plagioclasas sódicas 25-45%, lo que indica en su gran mayoría rocas formadas de magmas intermedios a ácidos.

Para las rocas sedimentarias no se realizaron análisis petrográficos por ser un porcentaje tan bajo.

En la tabla 4-2 se puede detallar la clasificación de las rocas por medio de análisis petrográficos y asociado a esto la identificación de los correspondientes minerales.

Tabla 4-2: Clasificación de las rocas según análisis petrográficos.

Rocas Ígneas		Rocas Metamórficas	
Tipo	Minerales	Tipo	Minerales
Pórfido andesítico	Plagioclasa, Hornblenda, Piroxenos, Biotita, Epidota.	Metabasita	Cuarzo, Plagioclasa, Actinolita, Apatito, Epidota, Clorita.
Pórfido Dacítico	Cuarzo, Plagioclasa Sódica, Hornblenda, Circón, Apatitos.	Esquisto Negro	Cuarzo, grafito
Granodiorita	Cuarzo, Plagioclasa Na, Feldespato K, Biotita, Hornblenda, Moscovita.	Metagabro	Plagioclasa sausuritizada, Clinopiroxenos, Cuarzo, Carbonatos, Clinozoita/Zoisita, Actinolita.
Monzogranito	Cuarzo, Plagioclasa, Feldespato K.	Milonita	Feldespato potásico, Clorita, Cuarzo, Grafito.
Basaltos	Plagioclasa, Piroxeno, Olivino, Vidrio	Anfibolita	Hornblenda, Plagioclasas

	con microcristales.			
Gabro	Plagioclasa, Augita, Hipersteno, Olivino.		Migmatita	Cuarzo, Hornblenda
Toba	Cuarzo, Feldespato alcalino, Biotita, Óxidos de Fe-Ti		Gneis	Cuarzo, Feldespato, Biotita

4.1.2 Caracterización mineralógica de los agregados

La caracterización mineralógica fue evaluada realizando tanto petrografía como XRD obteniéndose dos perspectivas interrelacionadas entre sí. La petrografía nos acerca a composición mineral, encontrándose una visión global de las rocas, mientras que el XRD muestra que minerales específicamente se tienen ya que abarca las muestras homogenizándolas.

4.1.2.1 Microscopía de polarización

Se obtuvieron resultados para cada tipo de roca analizada por análisis petrográfico. Los resultados se presentan a continuación, tanto para rocas ígneas como para rocas metamórficas.

4.1.2.1.1 Pórfidos Andesíticos

Estas rocas están compuestas por plagioclasas, hornblenda, piroxenos, biotita y epidota como se puede observar en la figura 4-2 y 4-3 para las muestras 5 y 8 con sus respectivas secciones delgadas.

Figura 4-2: a.) Sección delgada de la muestra 5 y b.) Composición mineralógica para la muestra 5, ambas para el pórfido andesítico.

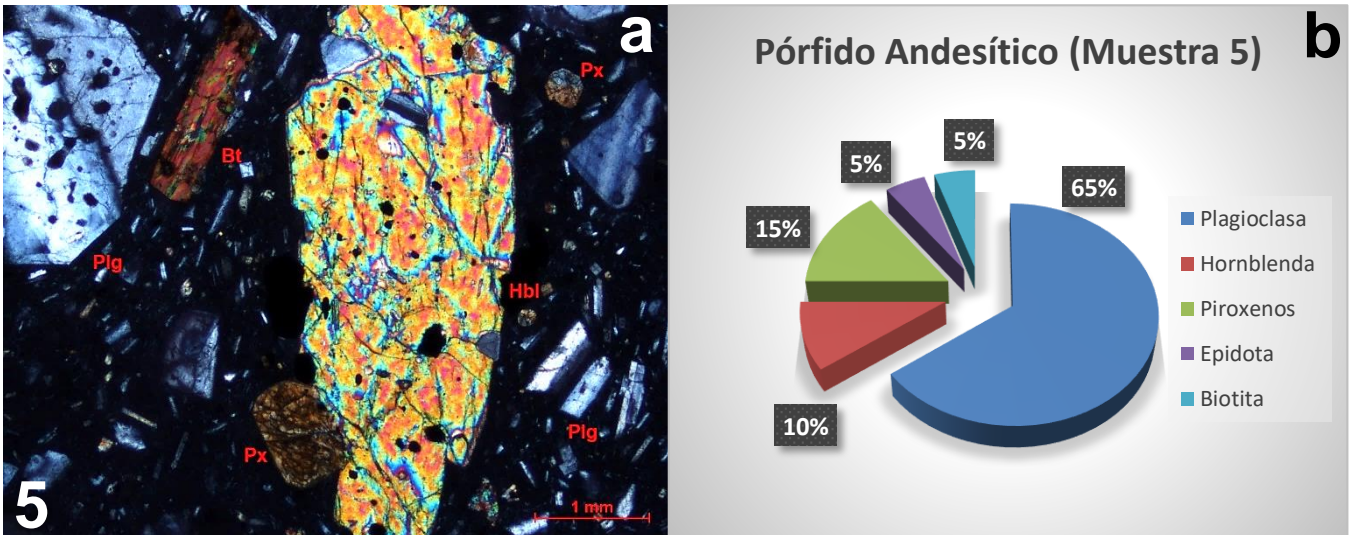
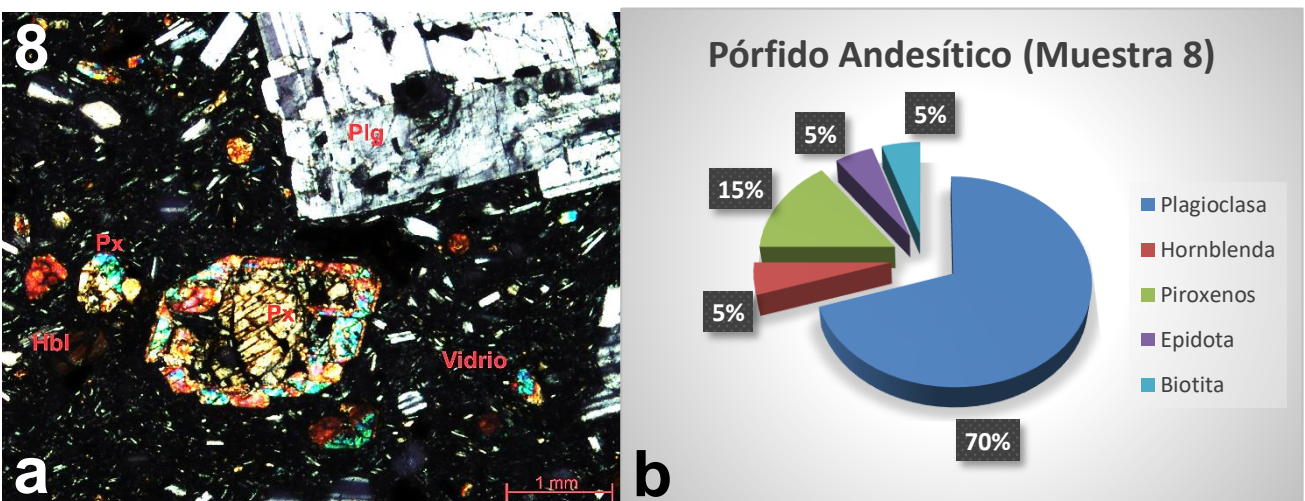


Figura 4-3: a.) Sección delgada de la muestra 8 y b.) Composición mineralógica para la muestra 8, ambas para el pórfido andesítico.



Estas rocas se pueden describir como una roca formada a partir de la solidificación del magma, es decir una mezcla fluida de origen tectónico a temperaturas muy elevadas en el

interior de la corteza terrestre, y que por los mismos procesos dinámicos de la tierra, sufrió un enfriamiento a velocidad moderada a poca profundidad ocasionando el crecimiento de algunos cristales embebidos en una matriz vítrea con microcristales y criptocristales, iniciando la solidificación del magma y la formación de cristales, y por fenómenos físicos afloro en la corteza terrestre, las muestras encontradas en el sitio de trabajo se caracterizan por la textura porfirítica con una fase félsica (en algunos casos más blanca y en otros más grisácea), que son plagioclasas y cierta cantidad de minerales Máficos.

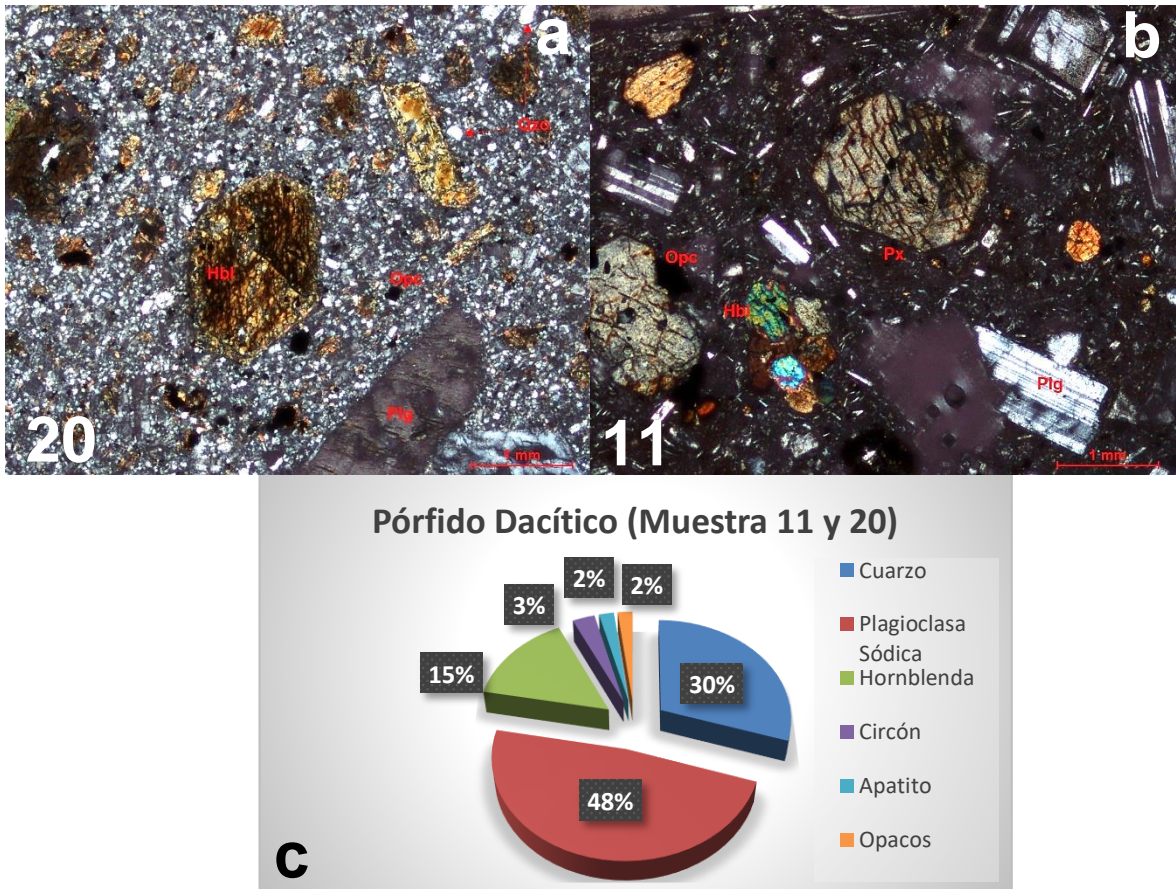
Las muestras se caracterizaron principalmente por presentar textura hipocristalina con abundantes fenocristales de plagioclasas entre los félsicos y anfíbol, biotita y piroxenos entre los máficos, las plagioclasas son muy abundantes (>90% del total de los feldespatos) y son de tipo sódico (oligoclasa/andesina), el porcentaje restante está dado en esta sección por hornblenda, piroxenos, biotita y epidota. En cuanto a la matriz, se observa que se encuentran microcristales de plagioclasa principalmente embebidos en vidrio volcánico (20 y 80% respectivamente)

4.1.2.1.2 Pórfido Dacítico

La dacita es una roca volcánica que puede ser muy similar a la riolita en muestra de mano, la dacita está compuesta por fenocristales principalmente de cuarzo y plagioclasa sódica, lo cual le da una textura hipocristalina porfirítica es decir mayor porcentaje de cristales que de vidrio, con presencia de masa fundamental de microcristales y criptocristales. Es frecuente la presencia de fenocristales de minerales máficos como la biotita, el anfíbol o menos frecuentemente el piroxeno. Las muestras estudiadas presentaron una Textura Porfirítica asociada a fenocristales de cuarzo, plagioclasa y biotita en una matriz Afanítica. Se puede observar fenocristales de plagioclasa embebidos en una matriz de vidrio y microcristales de minerales félsicos, hornblendas como observa en las muestras rotuladas 11 y 20.

En la figura 4-4 puede observarse tanto la sección delgada como la composición mineralógica para la roca.

Figura 4-4: a.) Sección delgada de la muestra 20, b.) Sección delgada de la muestra 11 y c.) Composición mineralógica para la muestra 20 y 11, ambas para el pórfido dacítico.

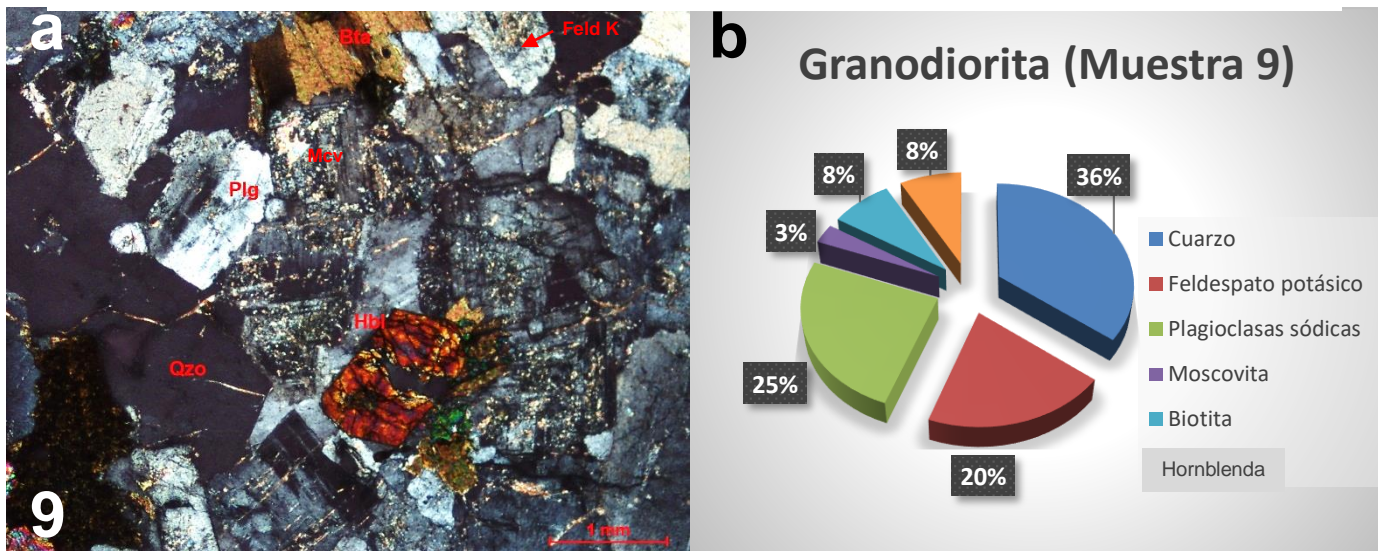


4.1.2.1.3 Granodiorita

Esta es una roca plutónica que presenta una textura holocristalina fanerítica compuesta principalmente por cuarzo, plagioclasas (normalmente oligoclasa o andesina), feldespato potásico en un porcentaje subordinado a las plagioclasas y máficos más frecuentes tenemos en esta sección biotita y hornblenda. Los porcentajes de los minerales oscuros entre los que se encuentran moscovita y biotita oscilan entre 10-30%; y entre los accesorios encontramos clorita, apatito y zircón como se observa en la muestra rotulada con el número 9.

En la figura 4-5 puede observarse tanto la sección delgada como la composición mineralógica para la roca.

Figura 4-5: a.) Sección delgada de la muestra 9 y b.) Composición mineralógica para la muestra 9.

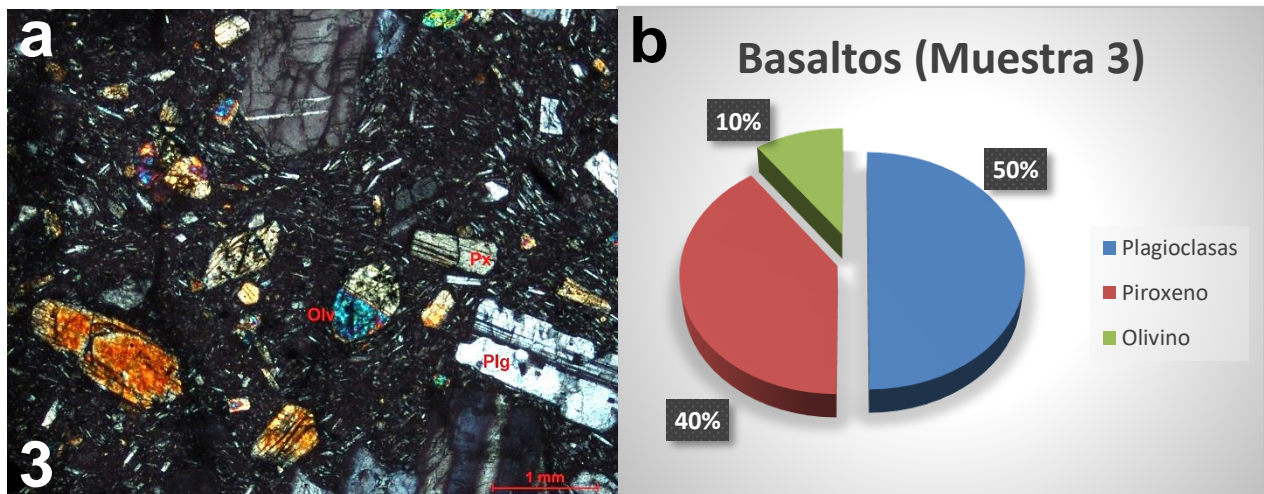


4.1.2.1.4 Basaltos

La formación de los basaltos se da cuando la lava llega a la superficie de la Tierra proveniente de un volcán a partir de fisuras por donde se pueden emplazar, o de una cordillera en medio del océano. Cuando la lava llega a la superficie se encuentra a temperaturas que oscilan entre los 2.100 a 2.200° C, pero se enfría rápidamente, convirtiéndose en roca sólida. La lava muy gruesa puede tardar muchos años en solidificarse totalmente. La textura que presentan las muestras analizadas es afanítica, vesicular.

Su contenido en sílice (SiO_2) es inferior al 50%, por lo que se considera una roca "básica". En función de la separación del gas del resto de los componentes del magma, la apariencia externa del basalto es variable. Las condiciones de viscosidad y movimiento de las lavas basálticas sobre la superficie originan minerales esenciales como Piroxenos, Plagioclasas y como minerales secundarios Olivino y Anfíbol. En la foto se puede apreciar una textura hipocristalina donde los fenocristales de plagioclasas están embebidos en una matriz de vidrio y plagioclasas microcristalinas, rodeado de piroxenos de tipo augita, y unos pocos olivinos (minerales secundarios), las plagioclasas para los basaltos son más ricas en calcio por lo que se asocia a la anortita. En la figura 4-6 puede observarse tanto la sección delgada como la composición mineralógica para la roca.

Figura 4-6: a.) Sección delgada de la muestra 3 y b.) Composición mineralógica para la muestra 3.

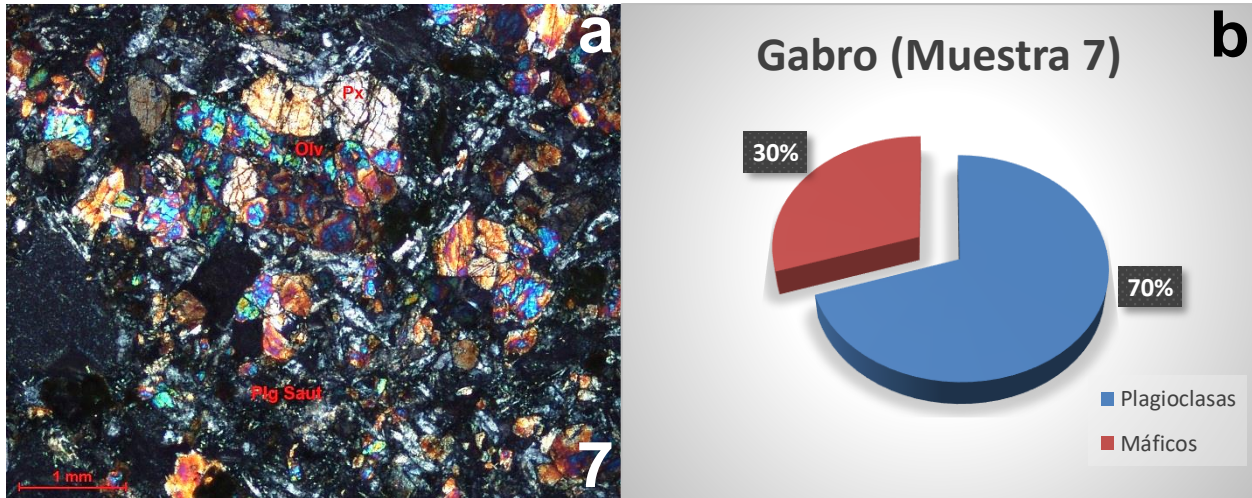


4.1.2.1.5 Gabro

El magma se enfría y solidifica de forma lenta y en condiciones de reposo en el interior de la corteza. Estas condiciones permiten que todos los silicatos cristalicen con un tamaño similar. Este tipo de roca que es plutónica está compuesto esencialmente de plagioclasa cálcica ($an > 50$), clinopiroxeno y ortopiroxeno, y además presenta óxidos de fe (opacos), en esta sección puede observarse claramente las plagioclasas alterada a sausruta que nos proporciona evidencia de que es de composición cálcica, y algunos piroxenos sufren proceso de uralitización pasando a anfíboles. La textura es holocristalina, fanerítica, granular (intermedia a gruesa). Plagioclasas (labradorita o bytownita) 45-70%, Máficos (augita, hiperstena, olivino) 25-50%.

En la figura 4-7 puede observarse tanto la sección delgada como la composición mineralógica para la roca.

Figura 4-7: a.) Sección delgada de la muestra 7 y b.) Composición mineralógica para la muestra 7.



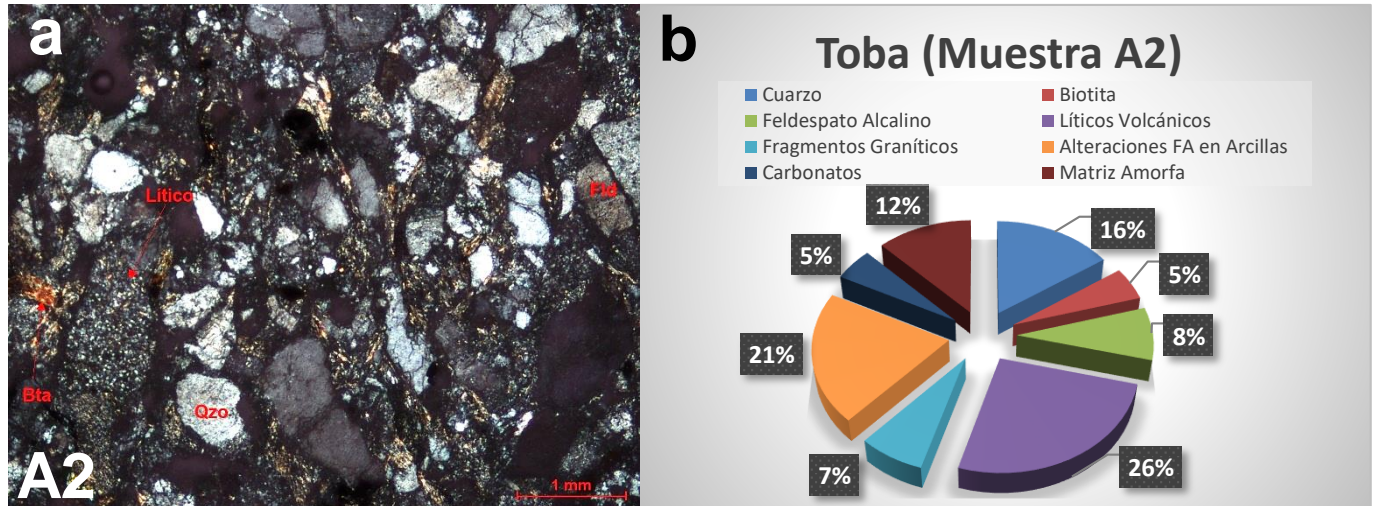
4.1.2.1.6 Toba

La toba volcánica es un tipo de roca ígnea, de baja densidad, generalmente de consistencia porosa, formada por la acumulación de cenizas u otros elementos volcánicos muy pequeños expelidos durante una erupción volcánica.

La roca presenta texturas porfíricas a glomeroporfíricas con micro fenocristales (inferiores a 0.05 mm) predominantemente de cuarzo (Qz), Feldespato Alcalino (FA) y Biotita (Bta); y ocasionalmente texturas piroclásticas, mostrando una matriz que varía de vítrea desvitrificada, vítrea silicificada y de ceniza. Los cristales de Qz, FA, Bta y Óxidos Fe-Ti, formando una textura piroclástica fluidal con una matriz de ceniza. Una de las notables diferencias es la variación en el tamaño de los cristales, en general siempre inferiores a los 0.3 mm.

En la figura 4-8 puede observarse tanto la sección delgada como la composición mineralógica para la roca.

Figura 4-8: a.) Sección delgada de la muestra A2 y b.) Composición mineralógica para la muestra A2.

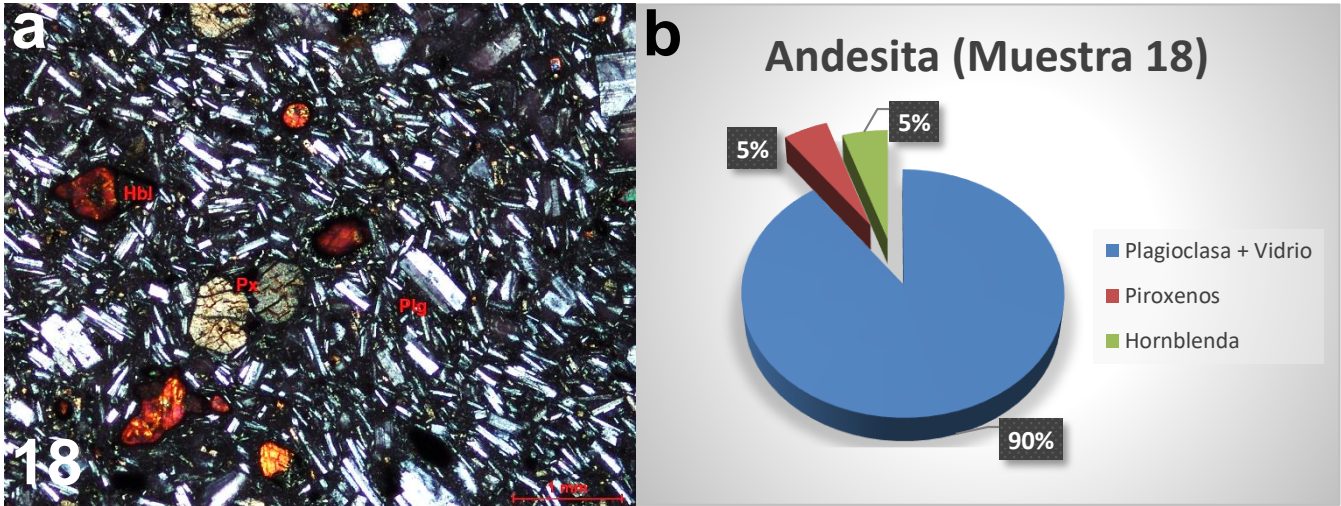


4.1.2.1.7 Andesita

La andesita es una roca ígnea volcánica de composición intermedia. Su composición mineral comprende generalmente plagioclasas y varios otros minerales ferromagnesianos como piroxeno, biotita y hornblenda. Hay que tener en cuenta que en rocas volcánicas con mucha matriz vítrea o microcristalina el color de esta matriz tiende a dársele a la roca en su conjunto, siendo un aspecto de la roca poco informativo, ya que las matrices pueden presentar tonos muy variados para un mismo tipo rocoso.

En esta sección podemos observar con claridad una típica andesita de textura hipocristalina fanerítica, donde más del 90% de la sección está constituida por una matriz de plagioclasas y vidrio. En la figura 4-9 puede observarse tanto la sección delgada como la composición mineralógica para la roca.

Figura 4-9: a.) Sección delgada de la muestra 18 y b.) Composición mineralógica para la muestra 18.



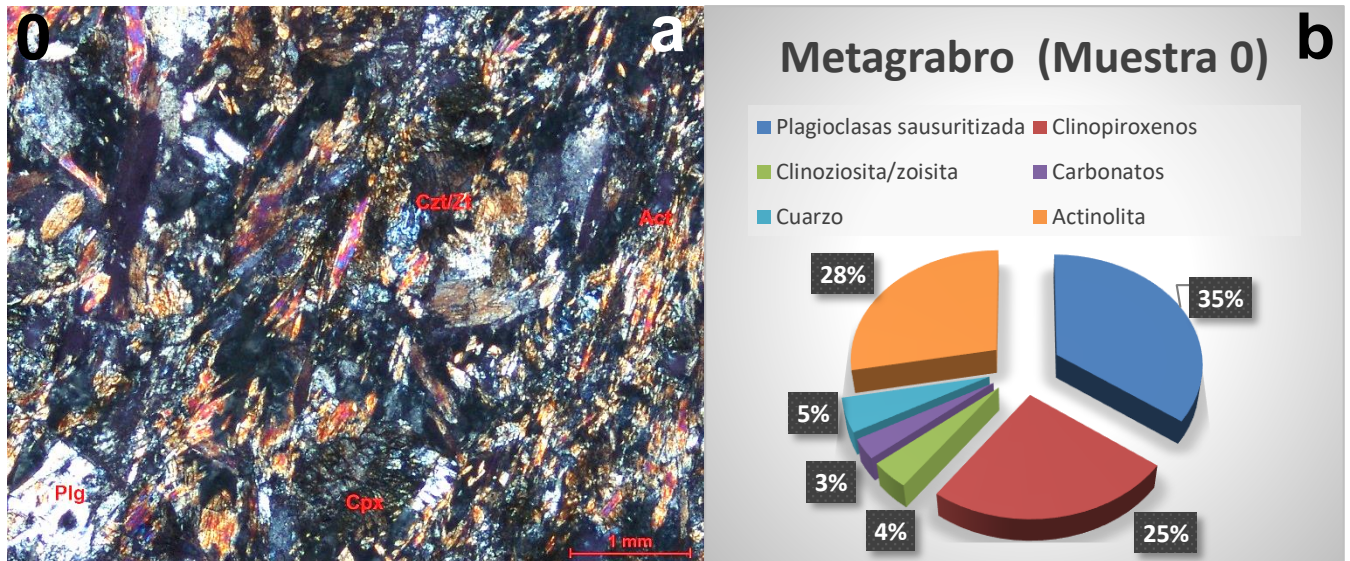
4.1.2.1.8 Metagabros

Formación de la roca ígnea inicialmente de composición básica, plutónica de tamaño de grano de medio a grueso, que posteriormente sufrió un proceso de metamorfismo en estado sólido. La roca estudiada en esta sección delgada presenta texturas de una roca ígnea, pero con un proceso metamórfico involucrado, corresponde a roca ígnea con una textura relicto-holocristalina, hipidiomórfica fanerítica con un tamaño de grano medio.

Las plagioclasas están intensamente sausrizadas, lo que indica que las plagioclasas originales tenían un componente importante de calcio. Los cristales anhedrales de bordes completamente irregulares conservan pequeños residuos de las plagioclasas.

En la figura 4-10 puede observarse tanto la sección delgada como la composición mineralógica para la roca.

Figura 4-10: a.) Sección delgada de la muestra 0 y b.) Composición mineralógica para la muestra 0.



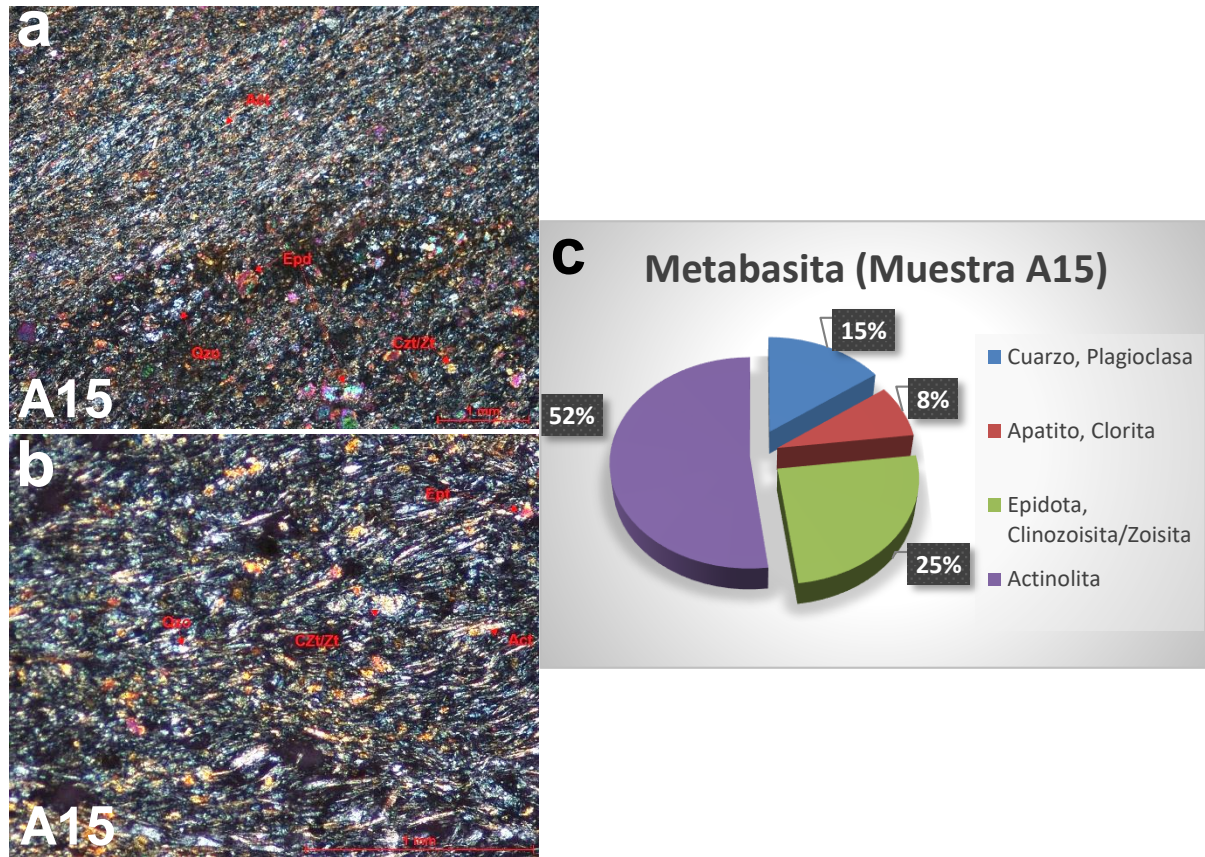
4.1.2.1.9 Metabasitas

Roca metamórfica de procedencia ígnea la cual presenta una estructura foliada muy marcada, en muestra de mano presenta un color verdoso con clara presencia de minerales orientados, donde se evidencia la clara presencia de minerales como cuarzo, plagioclasas, actinolita, epidota y clorita.

En esta sección se puede observar orientación de minerales definida por actinolita que se presenta en gran abundancia, esta orientación hace referencia a la foliación de la roca (textura nematoblástica). El cuarzo y la plagioclasa se presentan en muy poca proporción, así mismo se presentan minerales asociados a la epidota, estos son muy característicos por los altos colores de interferencia y alta birrefringencia, asociada a esta también se observan cristales de clinoziosita.

En la figura 4-11 puede observarse tanto la sección delgada como la composición mineralógica para la roca.

Figura 4-11: a.) Sección delgada de la muestra A15 con objetivo 4x, b.) Sección delgada de la muestra A15 con objetivo 10x y c.) Composición mineralógica para la muestra A15.



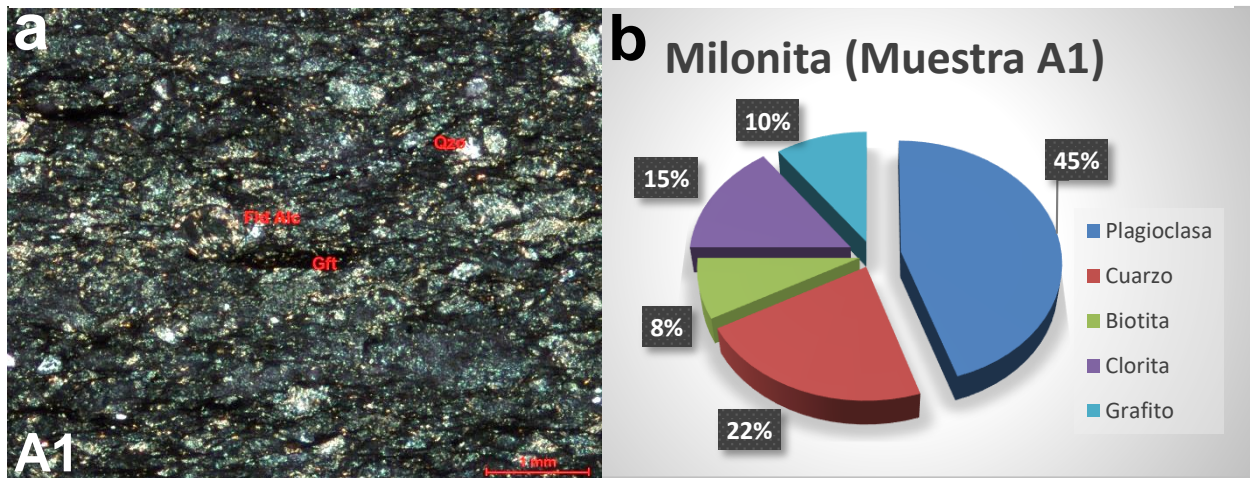
4.1.2.1.10 Milonitas

La milonita es una roca metamórfica de grano fino producto de metamorfismo dinámico, el cual le proporciona un régimen dúctil, donde el tamaño de grano disminuye producto del cizallamiento y a su vez generando ciertas texturas características de estas rocas la cual se denomina augen. Además, es una roca cohesiva, que se compone en 50–90 % de matriz de granos recristalizados y de formación nueva y que es foliada (muestra de mano). Por deformación plástica se movilizan los cuarzos y los feldespatos de tal manera, en donde los ejes de los cuarzos y de los feldespatos se alinean paralelamente y forman un bandeamiento junto con los filosilicatos.

En la figura 4-12 se puede observar en su gran mayoría, minerales de feldespato de tipo alcalino y cuarzo que forman “lentejones” típicos en las rocas miloníticas (textura augen), además de una serie de minerales recristalizados de cuarzo feldespatos; formada por

porfidoclastos fragmentados o distorsionados, que se ha formado como consecuencia de la deformación plástica. Cabe notar que la foliación que presenta la roca está definida por grafito.

Figura 4-12: a.) Sección delgada de la muestra A1 y c.) Composición mineralógica para la muestra A0 y A1.



4.1.2.2 Difracción de rayos X

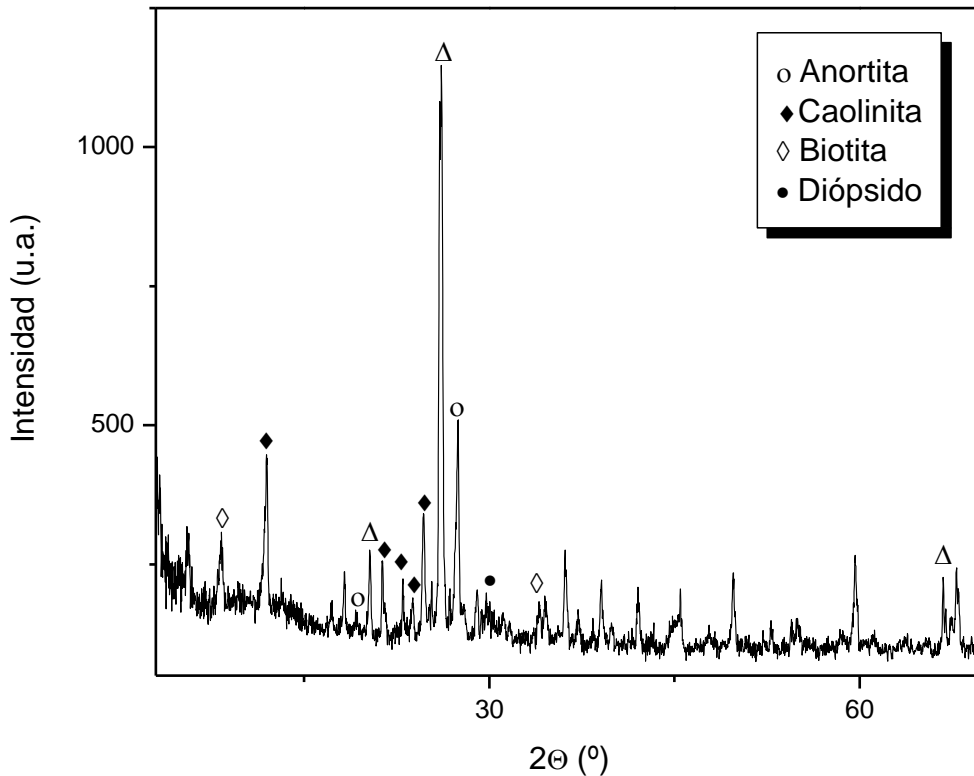
De forma organizada se presentará a continuación la discusión de cada una de las rocas estudiadas, las cuales son representativas de las muestras obtenidas para realizar la difracción de rayo X (XRD).

4.1.2.2.1 Metabasitas

En la figura 4-13 se observa el difractograma para las metabasitas en el cual se observan las fases cristalinas de anortita ($\text{Al}_2\text{CaSi}_2\text{O}_8$) [114], caolinita ($\text{Al}_2\text{H}_4\text{O}_9\text{Si}_2$) [115], diópsido ($\text{Al}_{0.19}\text{Ca}_{0.71}\text{Fe}_{0.08}\text{Mg}_{0.83}\text{Na}_{0.2}\text{O}_6\text{Si}_{1.98}\text{Ti}_{0.01}$) [116], biotita ($\text{Al}_{1.208}\text{Fe}_{1.392}\text{KMg}_{1.161}\text{O}_{12}\text{Si}_{2.792}\text{Ti}_{0.276}$) [117] y moscovita ($\text{Al}_3\text{H}_2\text{KO}_{12}\text{Si}_3$) [118], en los porcentajes del 43.9%, 35.1%, 10.3%, 7.9% y 2.9% respectivamente. Acorde los resultados, las fases cristalinas encontradas en la muestra de la Metabasita no había picos referentes a la clorita, actinolita y apatito, a su vez se encontró que las plagioclasas que fueron encontradas por petrografía hacían referencia a la anortita. Estos resultados obtenidos son complementados con la petrografía para así clasificar y describir correctamente todos los minerales encontrados en las

muestras, y como las rocas fueron pulverizadas para así analizar un pequeño porcentaje de la muestra puede inferirse que los otros minerales no eran tan representativos en la roca como para presentar picos de difracción. Alta concentración de aluminosilicatos ricos en hierro y calcio, con porcentajes considerables de potasio, magnesio y sodio. Tanto la moscovita como la caolinita son minerales arcillosos, presentando en los picos de difracción patrones armónicos cristalinos, debido a las estructuras laminares que son características de las arcillas.

Figura 4-13: Difractograma para las metabasitas.

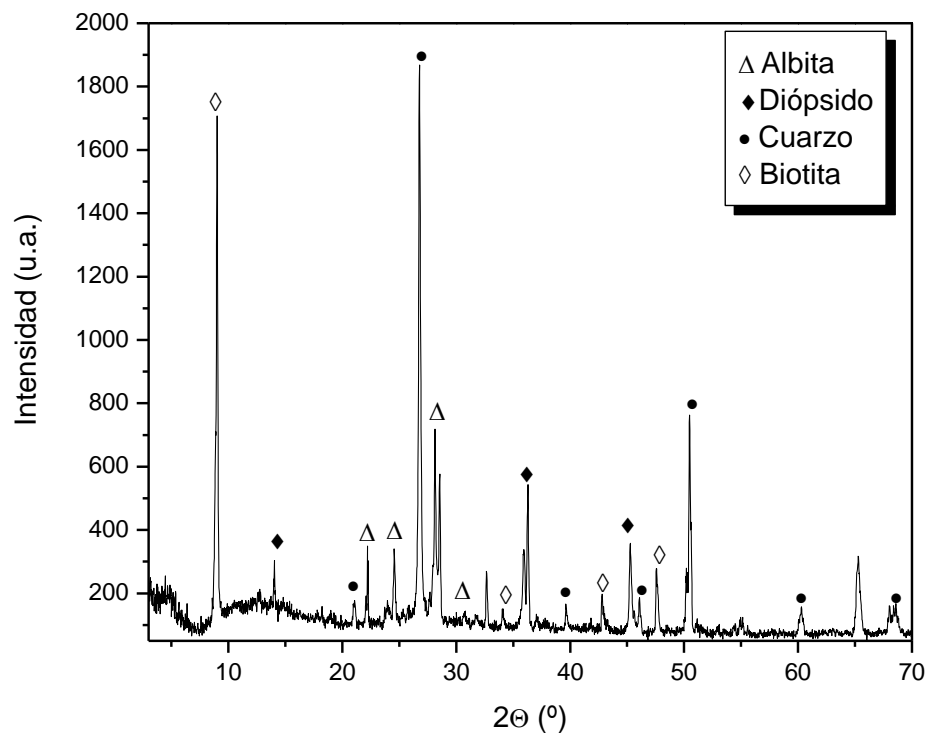


4.1.2.2.2 Granodiorita

De acuerdo con el difractograma para las granodioritas, presentado en la figura 4-14, se puede observar las fases cristalinas de albita ($\text{AlNaO}_8\text{Si}_3$) [119], cuarzo (SiO_2) [120], ortoclasa (AlKO_8Si_3) [121], diópsido ($\text{CaMgO}_6\text{Si}_2$) [122], y biotita

($\text{Al}_{1.207}\text{Fe}_{0.4}\text{K}_{1.906}\text{Mg}_{0.512}\text{Mn}_{0.007}\text{Na}_{0.034}\text{O}_{12}\text{Si}_{2.808}\text{Ti}_{0.067}$) [123], en los porcentajes del 35.3%, 25.1%, 16.0%, 14.0%, y 9.6% respectivamente. Obtenidas las fases cristalinas se encontró que para esta muestra de granodioritas no había picos referentes a la moscovita o mica, a su vez se encontró que el feldespato potásico que se halló por petrografía era de ortoclasa, y que los piroxenos se asociaban a picos de diópsido presentes en la muestra. Teniendo en cuenta las cantidades de los minerales se da a conocer que la roca tiene gran contenido de sodio y potasio, con presencia de hierro y magnesio. Además, en la figura 4-14, se presencia una banda ancha amorfa entre 10-15° en 2θ la cual se asocia al silicio vítreo en la roca.

Figura 4-14: Difractograma para las granodioritas.

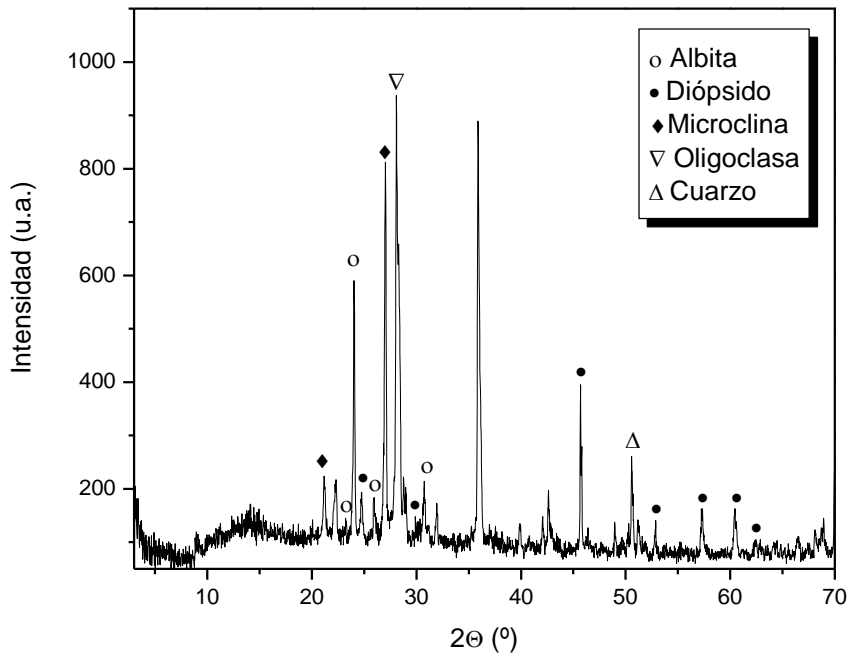


4.1.2.2.3 Pórfidos Andesíticos

Teniendo en cuenta la difracción obtenida para el pórfido andesítico, presentada en la figura 4-15, se puede observar las fases cristalinas de albita ($\text{Si}_3\text{AlO}_8\text{Na}$) [124], diópsido ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) [122], microclina ($\text{K}_{0.986}\text{Na}_{0.014}\text{Al}_{1.03}\text{Si}_{2.97}\text{O}_8$) [125], hornblenda ($\text{AlCa}_{1.66}\text{F}_{0.2}\text{Fe}_{1.33}\text{H}_2\text{K}_{0.015}\text{Mg}_{3.49}\text{Mn}_{0.02}\text{Na}_{0.625}\text{O}_{23.8}\text{Si}_{7.28}\text{Ti}_{0.06}$) [126], oligoclasa

($Al_{1.179}Ca_{0.179}Na_{0.821}O_8Si_{2.821}$) [127], epidota ($Al_{2.6}Ca_2Fe_{0.4}HO_{13}Si_3$) [128] y biotita ($Al_{1.161}Ca_{0.004}Cr_{0.054}Fe_{0.588}K_{0.958}Mg_{1.602}Mn_{0.03}Na_{0.016}O_{12}Si_{2.932}Ti_{0.522}$) [129], en los porcentajes del 32.6%, 21.2%, 12.3%, 12.1%, 11.1%, 6.9% y 3.9% respectivamente. Obtenidas las fases cristalinas se encontró que para el pórfido andesítico analizado las plagioclasas halladas mediante petrografía hacían alusión a albita y oligoclasa, a su vez, los feldespatos asociados a esta roca se determinaron, siendo la fase mineral microclina, y el piroxeno observado se trataba de diópsido. Los porcentajes son similares para el XRD como para la petrografía. Se encuentra gran presencia de sodio, magnesio y potasio en esta roca, además de ser rica en calcio, hierro y aluminio. Así mismo, en el difractograma hay presencia de silicio vítreo debido a la banda amorfa que se localiza entre los 10 y 15° en 2θ.

Figura 4-15: Difractograma para el pórfido andesítico.

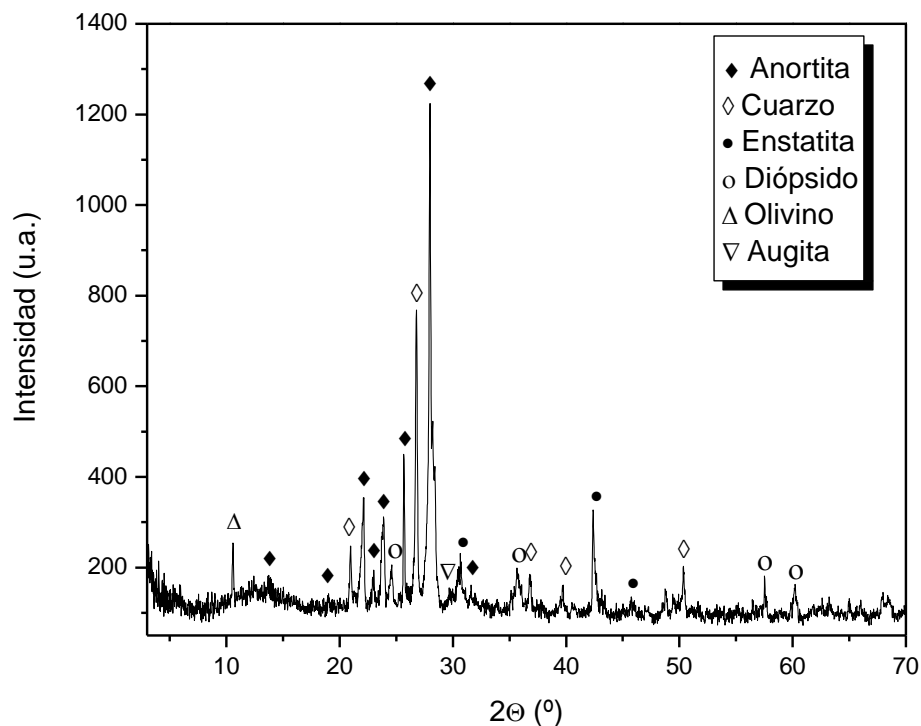


4.1.2.2.4 Basaltos

Acorde con el difractograma para los basaltos que se muestra en la figura 4-16, se identificaron las fases cristalinas de anortita ($Al_2CaO_8Si_2$) [130], enstatita ($Mg_2O_6Si_2$) [131],

olivino ($\text{Ca}_{0.007}\text{Fe}_{0.164}\text{Mg}_{1.817}\text{Mn}_{0.003}\text{Ni}_{0.01}\text{O}_4\text{Si}$) [132], diópsido ($\text{CaMgO}_6\text{Si}_2$) [122], y augita ($\text{CaFe}_{0.25}\text{Mg}_{0.74}\text{O}_6\text{Si}_2$) [133], en los porcentajes del 52.4%, 35.6%, 6.0%, 4.5% y 1.5% respectivamente. Estos resultados satisfacen claramente los análisis obtenidos por secciones delgadas implementadas en el ensayo de petrografía realizado al basalto, en donde la anortita es la plagioclasa hallada. Se presenciaron picos referentes a diópsido y enstatita las cuales hacen referencia al porcentaje de piroxenos obtenidos por petrografía. Adicionalmente se puede observar una banda ancha amorfa entre $10\text{-}15^\circ$ en 2θ la cual puede estar asociada a la presencia de silicio amorfo en la roca. Puede encontrarse de este análisis mineral que los basaltos poseen aluminosilicatos ricos en calcio, con presencia de magnesio y hierro mayoritariamente.

Figura 4-16: Difractograma para los basaltos.

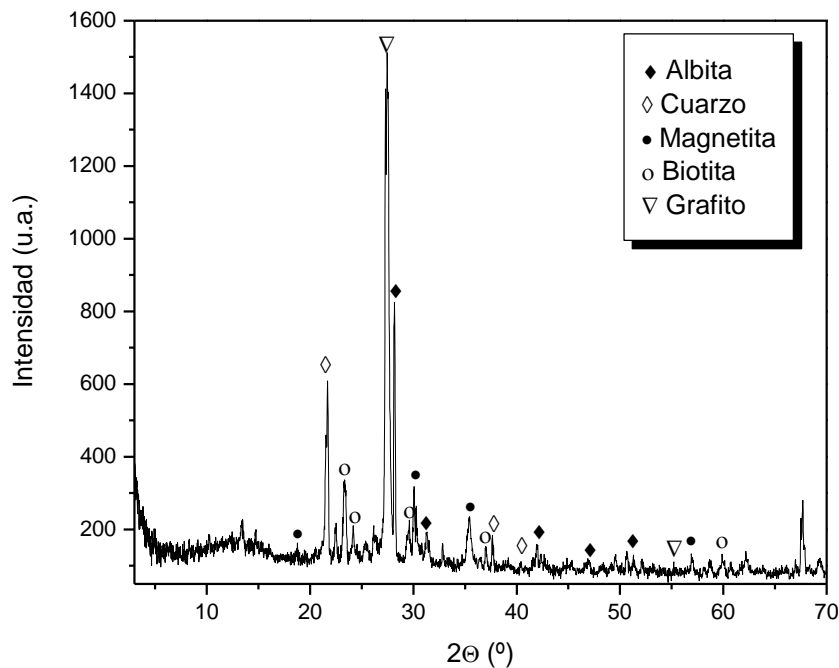


4.1.2.2.5 Pórfido Dacítico

Analizando el difractograma obtenido de las dacitas que se ilustra en la figura 4-17, fueron identificadas las fases cristalinas de albita ($\text{Al}_2\text{NaO}_8\text{Si}_3$) [134], cuarzo (SiO_2) [135],

hornblenda ($\text{AlCa}_{1.66}\text{F}_{0.2}\text{Fe}_{1.33}\text{H}_2\text{K}_{0.015}\text{Mg}_{3.49}\text{Mn}_{0.02}\text{Na}_{0.625}\text{O}_{23.8}\text{Si}_{7.28}\text{Ti}_{0.06}$) [127], magnetita ($\text{Fe}_{2.814}\text{O}_4\text{Ti}_{0.186}$) [136], grafito (C) [137], y biotita ($\text{Al}_{1.207}\text{Fe}_{0.4}\text{K}_{1.906}\text{Mg}_{0.512}\text{Mn}_{0.007}\text{Na}_{0.034}\text{O}_{12}\text{Si}_{2.808}\text{Ti}_{0.067}$) [123], en los porcentajes del 71.2%, 15.0%, 9.0%, 2.6%, 1.1% y 1.1% respectivamente. Este análisis estructural muestra correlación con el análisis petrográfico realizado para el pórfido dacítico, en el cual se encuentra el cuarzo, hornblenda y biotita, además se identificaron las fases cristalinas específicas de plagioclasas sódicas, tales como la albita. A su vez, se encuentra, que los minerales opacos son magnetita. En el difractograma se puede observar una banda ancha amorfa entre los 10-15° en 2θ la cual puede asociarse a la presencia de silicio amorfo en la roca debido a la matriz vítrea que engloban a las plagioclasas.

Figura 4-17: Difractograma para los pórfidos dacíticos.



Nota: Debido a que las muestras presentaban gran cantidad de fases, y algunas de ellas presentaban solapamiento de picos al ser de la misma familia (e.g. plagioclasa), sólo pudo identificarse la totalidad de las fases mediante el software Match! versión demo.

4.1.3 Caracterización física de los agregados

A continuación, son presentados los resultados de la caracterización morfológica, de peso y absorción para cada uno de los materiales a evaluar y su respectiva discusión.

4.1.3.1 Caracterización morfológica

Se observa de la figura 4-18 una morfología angular, teniendo orillas bien definidas que se forman en la intersección de las caras menos planas. Esta morfología es muy particular de rocas trituradas [60]. Las formas de los agregados tienen influencia en la mezcla y las proporciones para realizar la mezcla, que generalmente afectan la trabajabilidad del concreto en estado plástico. Este efecto se debe principalmente a los ángulos generados en las rocas, tales como las alargadas y las escamosas. Como los agregados triturados presentan irregularidad en las caras y sus ángulos, inclinándose a formas cúbicas, son adecuados para el uso en concretos debido a que no ocasionan empaquetamiento anisotrópico [56].

Figura 4-18: Clasificación de tipos de rocas.



Por parte de la textura superficial se encuentra que tienen rugosidades en todas las caras y son de superficie irregular, lo que mejora extensamente, según literatura, la adhesión entre el cemento y el agregado grueso [56].

Un factor muy influyente en la textura superficial del agregado es la velocidad de solidificación dependiendo de la localización de este en la tierra. De acuerdo con lo anterior se entrará a detalles dependiendo de la roca para así caracterizarla a profundidad.

4.1.3.1.1 Metabasita

Debido a su estructura foliada, ondulada e irregular pueden ser fácilmente separados en minerales alargados de granos individuales, formando superficies irregulares en ambas caras alargadas. Teniendo en cuenta su plano preferencial se obtendrán láminas delgadas alargadas después del proceso de trituración, conseguirán una alta área superficial mejorando así la adhesión entre la matriz cementicia y el agregado. Al tener un alto porcentaje de textura nematoblástica (> al 70%)

se puede inferir que las láminas serán homogéneas en dimensiones, mejorando a su vez la adhesión homogénea entre las rocas y la pasta de cemento. El hecho de tener planos preferenciales genera un gran problema a la hora de realizar un concreto de calidad y durabilidad, esto se debe a que genera cargas anisotrópicas en el concreto final e induciría a presentar caminos de fallas guiados por la organización interna del componente discontinuo: agregados triturados.

4.1.3.1.2 Granodiorita

La granodiorita al ser una roca plutónica presenta una solidificación lenta generando una superficie homogénea por cada cristal formado, obteniéndose un ordenamiento a larga escala por la superficie, presenta textura fanerítica con gran presencia de granos gruesos, que al ser triturados formaran una superficie menos rugosa debido a que el esfuerzo generado a la roca en el momento de triturarse generará fallas por los bordes de grano, propagándose así la grieta de forma intergranular. Se presenta gran angularidad que beneficia la adhesión de la matriz con el material discontinuo, pero su rugosidad no será tan grande.

4.1.3.1.3 Pórfidos Andesíticos

Para los pórfidos andesíticos los cuales se enfrían lentamente se encuentra que la superficie puede ser homogénea. Sin embargo, al poseer una textura porfídica se encuentra que su rugosidad al ser triturado va a ser mucho mayor, consecuente a que el fallo intergranular va a ser a nivel micro. Este fenómeno se debe a la matriz de cristales de menor tamaño que envuelve los cristales grandes, presentando así angularidad por el hecho de ser triturada. Estas características hacen que el pórfido andesítico sea muy buen

material para ser utilizado como agregado grueso debido a su alta rugosidad que ocasiona un área específica alta.

4.1.3.1.4 Basaltos

Los basaltos, por su parte, presentan características completamente diferentes debido a su gran rápida solidificación, teniéndose que su rugosidad puede ser alta debido al proceso de enfriamiento, generando así una superficie heterogénea de cristales de poco tamaño. Por lo anterior, presenta una textura vesicular, lo cual aumenta los poros que tiene esta roca. Estas características mejoran la adherencia del agregado con la pasta por su alta área específica con respecto a su peso, ya que son muy poco densas por los poros internos de la roca. Estas propiedades son de alto interés en la fabricación de concretos de alta durabilidad debido a que generaran concreto menos densos.

4.1.3.1.1 Pórfido Dacítico

Por último, se tienen los pórfidos dacíticos, el cual al ser una roca subvólcanica o hipoabisal tiene una velocidad de enfriamiento un poco más acelerada mostrando rugosidad debido a la heterogeneidad de los cristales formados. Además de tener poros por el mismo tipo de enfriamiento. Sin embargo, esta muestra presenta una textura porfirítica lo cual le atribuye características similares que el pórfido andesítico. Está roca, además de tener buena morfología debido a la trituración, su misma textura ayuda a que esta sea un espécimen apto para la fabricación de concreto de baja densidad con buena adherencia entre el material particulado y la matriz cementicia.

4.1.3.2 Peso específico y absorción

El peso específico está relacionado implícitamente con la absorción que tiene el material. También se puede decir que tanto la absorción como el peso específico se relacionan ampliamente con la porosidad que tiene la roca. Entonces, como el peso específico se relaciona, que tanto peso ocupa la muestra y el aire encapsulado en ella, nos daría un acercamiento a la porosidad que este tiene [2].

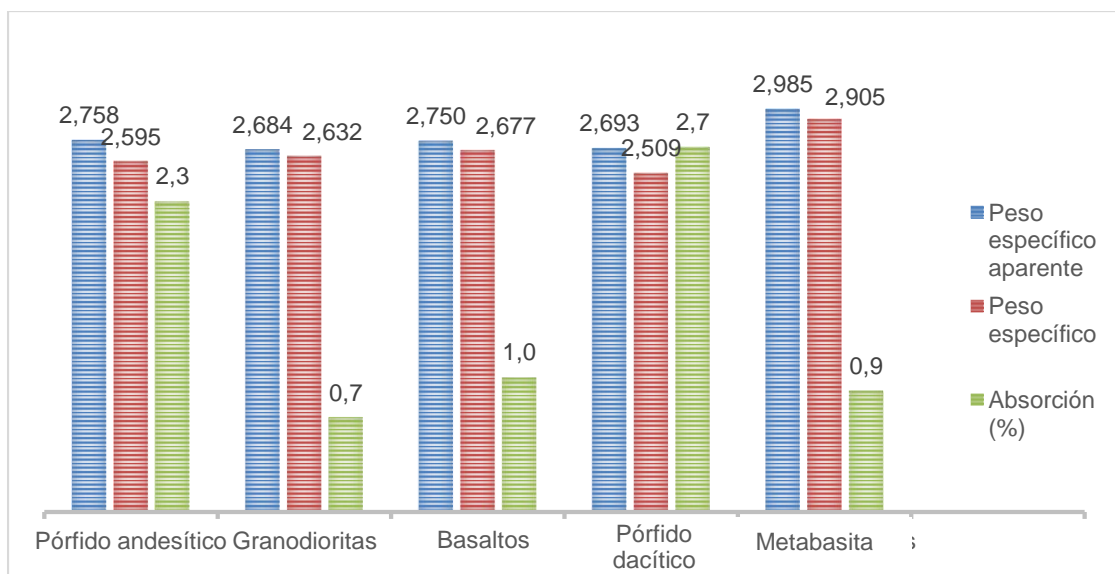
Como se observa en la figura 4-19, las granodioritas y las metabasitas fueron las rocas que menos agua absorbieron de los experimentos al tener muy poca diferencia entre el peso específico y el aparente. De lo anterior se puede inferir que son los materiales que menos poros tienen. Las granodioritas presentan la menor absorción debido a su

naturaleza plutónica, que ocasiona una textura fanerítica de cristales de gran tamaño y de ordenamiento a gran escala, obteniéndose una roca muy sólida holocristalina. Por el contrario, las metabasitas son rocas metamórficas con gran contenido de filosilicatos e inosilicatos, las cuales pueden absorber agua. Aun así, no absorben demasiado ya que presentan textura foliada a causa de su metamorfismo.

Los pórfidos dacíticos y los pórfidos andesíticos se comportan diferente a las granodioritas y a las metabasitas, asumiendo que tienen mayor cantidad de poros. Entonces, los pórfidos dacíticos al ser una roca de origen subvulcánico pueden presentar poros por los gases atrapados a los que tiene acceso los fluidos. De lo anterior se puede inferir que los poros de los pórfidos son de menor diámetro a los que son muy afines las moléculas de agua. Este fenómeno es causado por la textura porfirítica que presentan estas dos rocas que al tener una matriz microcristalina.

Los basaltos a su vez se encuentran neutrales debido a que no presentan gran cantidad de poros a los que tiene acceso las moléculas de agua, como los pórfidos dacíticos y andesíticos, ver figura 4-19. Sin embargo, éstos poseen poros de mayor diámetro al tener textura vesicular, que a mayor cantidad de poros en los agregados mejora la adherencia entre la matriz y la parte discontinua del concreto, pero a su vez genera mayor desgaste.

Figura 4-19: Peso específico y absorción de los materiales extraídos del río Chinchiná y triturados.



De acuerdo con los resultados obtenidos de absorción, se realizan las mezclas para la fabricación del concreto y esta ayuda a establecer la relación W/CM, la norma acepta porcentajes de absorción menores o iguales al 3% por lo que todos los materiales son aptos, sin embargo, a mayor porosidad-absorción se necesitará más cantidad de agua en la mezcla para mejorar la trabajabilidad. Debido a que la pasta de cemento es la principal fuente de elasticidad del concreto, agregados con bajas demandas de agua producen concretos que tienen menor tendencia a la deformación.

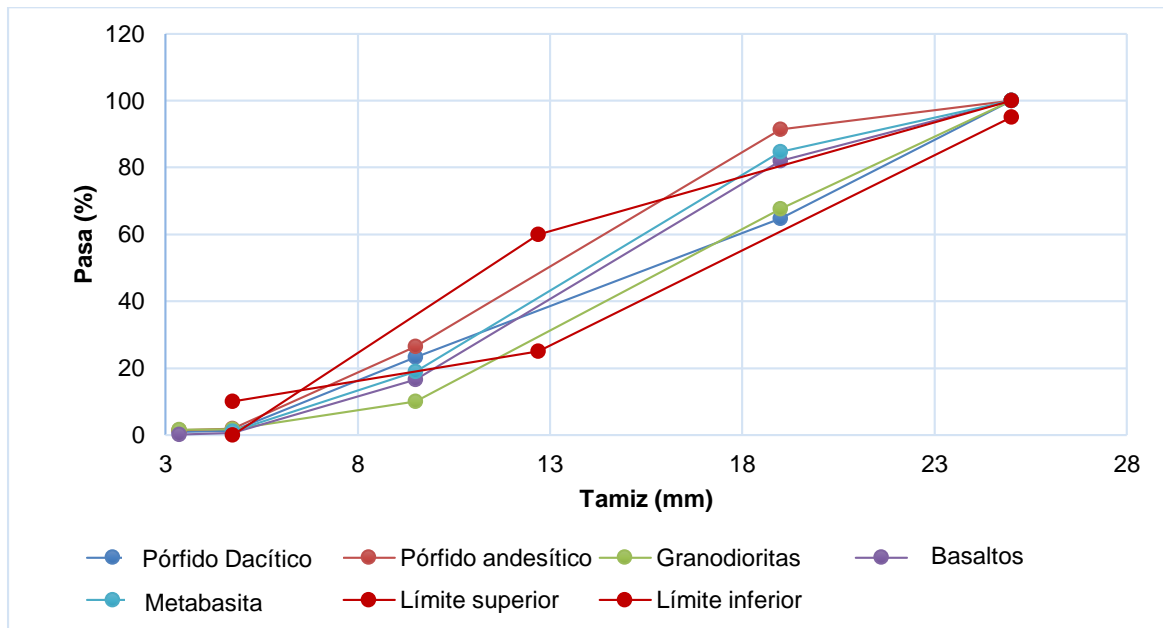
Acorde con los resultados obtenidos que se muestran en la figura 4-19, las granodioritas, las metabasitas y los basaltos son con los que mejor resulta trabajar para la fabricación de concretos debido a que tienen menor cantidad de poros y necesitarían menor cantidad de relación W/CM, reduciendo así el coste de fabricación y aumentando de este modo la durabilidad ya que es menor la permeabilidad en menores relaciones W/CM [2, 14], y esta misma condición aporta a la resistencia a compresión final del concreto [18].

4.1.3.3 Granulometría

El análisis granulométrico de las muestras se realizó por categoría de roca. Las rocas analizadas fueron: pórfido dacítico, pórfido andesítico, granodioritas, basaltos y metabasitas. El análisis granulométrico ayudará a especificar mejor la trabajabilidad de la mezcla y su consumo de agua en cuanto a la relación W/CM. Las granulometrías para agregados cuando se caracterizan tienen ciertos límites para confirmar si este es adecuado para la realización de concretos.

Se observa de la figura 4-20 que tanto el pórfido andesítico como las metabasitas superan el límite superior para tamices más grandes. Las granodioritas por su parte están por debajo del límite inferior. Algunas causas a las que se les puede atribuir este comportamiento es la sección de trituración del agregado, aunque depende de más factores como son la cantidad de roca suministrada al equipo, la potencia del equipo y la longitud de las aspas del tambor de trituración.

Figura 4-20: Curvas de gradación para las rocas analizadas.



En mayor detalle, el pórfido dacítico al estar dentro del rango establecido para la gradación puede deberse a su homogeneidad en su textura como roca, la cual tiene textura porfírica incluyendo fenocristales inmersos en una matriz microcristalina. Estos fenocristales no tienen mayor tamaño ya que su naturaleza de roca subvolcánica no favoreció el crecimiento de los cristales que están dispersos por toda la matriz. Estas características atribuyen al comportamiento que tienen frente a la cantidad retenida en cada tamiz.

Al estar por debajo del límite inferior, las granodioritas, presentan gran cantidad de fenocristales que son de tamaños irregulares y dimensiones heterogéneas, lo cual propicia que las grietas formadas por los bordes de grano separen tanto cristales de gran tamaño como de menor diámetro, los cuales al volver a ser triturados aumenta la cantidad retenida en un tamiz de menor abertura.

Los basaltos son las rocas que están justo en los límites, tanto inferior como superior, de la gradación de los agregados. Ésto puede ser a causa de su gran porosidad que proporciona su textura vesicular, además de tener gran cantidad de microcristales que aglomeran fenocristales. Esta roca al ser triturada disipa los esfuerzos por su matriz generando caminos de falla en la estructura microcristalina. El recorrido de la grieta

encapsula tanto fenocristales como conglomeración de microcristales, que al volver a ser triturados disminuyen el tamaño del agregado debido a que la conglomeración de microcristales provenientes de la matriz fue segregada en más partículas de menor dimensión, y a su vez aumenta el tamaño de grano ya que los fenocristales triturados se separan de la matriz microcristalina.

Como las metabasitas presentan la particularidad de tener estructura laminar, generan un plano preferencial y esto ayuda a que al momento de la trituración este se deslamine. Adicional a lo anterior también tiene textura granoblástica lo que aporta al aumento de la cantidad del tamaño máximo retenido por la gradación. Los pórfidos andesíticos y dacíticos, se les atribuye el aumento puesto que tienen textura porfídica con abundante cantidad de fenocristales que al triturarse pueden quedar de gran tamaño al ser expuestos de su matriz hialocristalina.

Para el pórfido andesítico y las metabasitas al tener un incremento en la cantidad del tamaño máximo del agregado disminuye considerablemente el desarrollo superficial de éstos mismos y tiende a reducir la proporción de la pasta de cemento necesaria para mezclar el concreto. Esta característica también puede inducir una segregación de los agregados cuando el concreto este en movimiento. Ésto es a causa del movimiento de la masa global generando movimiento en cada partícula de la mezcla, obteniendo así una inercia por cada una de estas partículas, impulsando a los agregados a separarse de la mezcla con una magnitud dependiente de la masa de éste. Así mismo, para concretos normales el incremento en el tamaño máximo de agregado conlleva a la posibilidad de disminuir el consumo de agua y así incrementar la resistencia y durabilidad final del concreto trabajado.

De acuerdo con lo comentado anteriormente, tanto las metabasitas como los basaltos, los cuales están por encima del límite superior, sin tener gran desfase en la tendencia, aporta un aumento en la resistencia y la durabilidad la cual es de interés para el trabajo. A su vez el pórfido andesítico al tener un aumento en la cantidad del tamaño máximo que excede en gran cantidad la del tamaño máximo de agregado puede ocasionar un aumento en los esfuerzos internos, disminuyendo así la resistencia, además de producir mezclas rígidas.

En este contexto, los pórfidos dacíticos y los basaltos tienden a estar dentro de los límites, teniendo una granulometría óptima para fabricar concretos, y las granodioritas pueden ser implementadas.

4.1.4 Caracterización mecánica de los agregados

En esta sección se muestran los resultados mecánicos que obtuvieron los agregados triturados, en donde se evaluó la resistencia al desgaste y la resistencia a compresión.

4.1.4.1 Resistencia al desgaste

Según discute Conca y Cubba [138], la dureza de una roca está intrínsecamente correlacionada con el desgaste que puede realizarse a esta misma. Aunque el término de dureza en una roca es ampliamente utilizado, esto solo hace referencia a la característica de la roca y no de los minerales que la constituyen. Ésto se debe a que el desgaste que puede producirse en una roca no depende solamente de la dureza, está influenciada por distintas propiedades que presenta la roca, tales como la resistencia a la erosión, la resistencia a la abrasión, la durabilidad, la cohesión, entre otros. Sin embargo, la resistencia a la abrasión de las rocas, en específico, depende de la dureza individual de los minerales constituyentes, en conjunto de cómo es la interacción entre los fenocristales y la matriz de la roca.

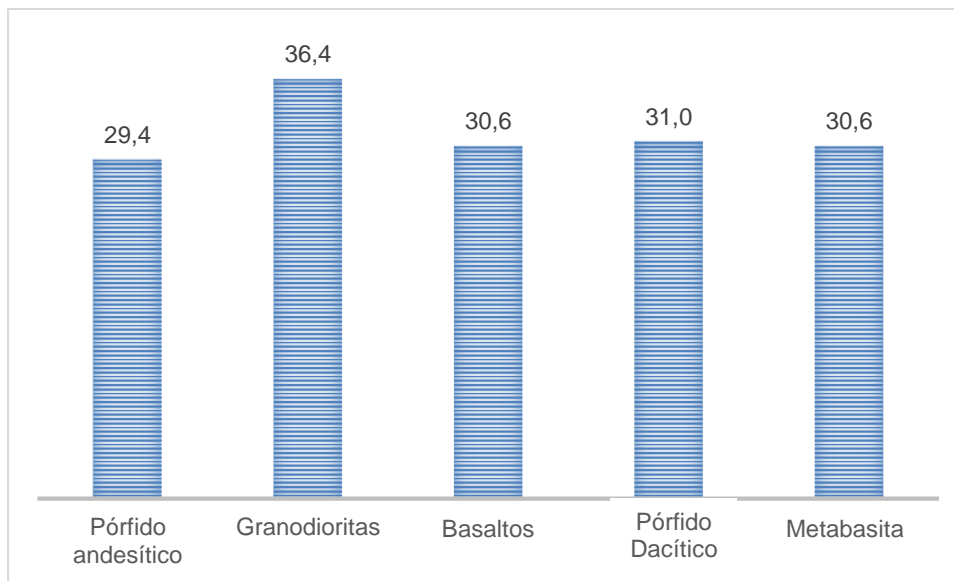
Como propone Atkinson [139], un método para poder obtener la dureza de la roca es mediante la escala de Mohs, la petrografía por medio de microscopio polarizado de secciones delgadas y una técnica semi-cuantitativa como lo es XRD. Estas dos últimas técnicas se emplean para encontrar los minerales y sus proporciones, para así poder calcular, a partir de la dureza individual de los minerales presentes en las rocas, una dureza global de acuerdo con las proporciones obtenidas tanto por petrografía como por XRD. En la tabla 4-3 se presentan los minerales y sus respectivos porcentajes encontrados por petrografía y XRD. Para las metabasitas al no poder comparar con respecto a la dureza encontrada por petrografía se utiliza la hallada por XRD, siendo su valor de $4,35 \pm 0,27$.

Figura 4-21: Dureza global de la roca hallada por medio de XRD y petrografía.

Rocas	Petrografía				XRD				Promedio
	Composición	(%)	Dureza		Composición	(%)	Dureza		
	Mineral		Mín	Máx	Mineral		Mín	Máx	
Pórfido Andesítico	Plagioclasas	65,00	3,90	4,23	Albita	32,60	1,96	2,12	5,93±0,43
					Oligoclasa	11,10	0,67	0,72	
	Hornblenda	10,00	0,60	0,60	Hornblenda	12,00	0,60	0,72	
	Piroxeno	15,00	0,75	0,98	Diópsido	21,20	1,06	1,38	
	--	--	--	--	Microclina	12,30	0,74	0,80	
	Epidota	5,00	0,25	0,35	Epidota	6,90	0,41	0,48	
	Biotita	5,00	0,10	0,13	Biotita	3,90	0,08	0,10	
Total	--	100,00	5,60	6,28	--	100,00	5,51	6,32	
Pórfido Dacítico	Cuarzo	30,00	2,10		Cuarzo	15,00	1,05		6,66±0,59
	Plagioclasas	48,00	2,88	3,12	Albita	71,20	4,27	4,63	
	Hornblenda	15,00	0,90	0,90	Hornblenda	9,00	0,45	0,54	
	Zircón	3,00	0,23		--	--	--	--	
	Apatito	2,00	0,10		--	--	--	--	
	Opacos	2,00	0,06		Magnetita	2,60	0,14	0,17	
					Grafito	1,10	0,01	0,02	
	--	--	--	--	Biotita	1,10	0,02	0,03	
Total	--	100,00	6,27	6,51	--	100,00	5,94	6,44	
Basaltos	Plagioclasas	50,00	3,00	3,25	Anortita	52,40	3,67		6,22±0,30
					Diópsido	4,50	0,27	0,29	
	Piroxeno	40,00	2,00	2,60	Augita	1,50	0,08	0,09	
					Enstatita	35,60	1,96		
	Olivino	10,00	0,65	0,70	Olivino	6,00	0,29	0,11	
Total	--	100,00	5,65	6,55	--	100,04	6,27	6,32	
Granodioritas	Cuarzo	36,00	2,52		Cuarzo	25,10	1,76		5,80±0,28
	Plagioclasas	25,00	1,50	1,63	Albita	35,30	2,12	2,29	
	Feldespatos	20,00	0,90		Ortoclasa	16,00	0,96		
	Biotita	8,00	0,16	0,20	Biotita	9,60	0,19	0,24	
	Moscovita	3,00	0,00	0,08	--	--	--	--	
	Piroxeno	8,00	0,40	0,52	Diópsido	14,00	0,70	0,91	
Total	--	100,00	5,48	5,84	--	100,00	5,73	6,16	

Teniendo en cuenta la dureza de las rocas de la tabla 4-3, el de desgaste presente en la figura 4-21, el tipo de roca y la textura propia de cada muestra se puede llegar a una aproximación en la discusión de los fenómenos mecánicos asociados a estos materiales y así poder definir su calidad. A partir de los resultados obtenidos se observa que no necesariamente una roca dura es menos abrasiva.

Figura 4-22: Porcentaje de desgaste por la máquina de Los Ángeles.



En el caso de las granodioritas que presentan un porcentaje mayor de desgaste (36,4%), un factor influyente es la naturaleza de la roca, ya que al ser ígnea-plutónica, suelen ser duras debido a la naturaleza entrelazada de los minerales silicatados que lo conforman, pero es potencialmente frágil al ser plutónica a causa de tener grandes cristales que favorecen los planos de exfoliación, reduciendo la resistencia a la fracturación [140]. Se ha reportado que la cantidad de silicio influye considerablemente en LLA debido a las propiedades adhesivas, siendo una roca intermedia/acida mejor en propiedades adhesivas que la roca básica, y que además del contenido de sílice también afectan los contenidos de feldespatos (Potásico y Sódico), y posiblemente de aluminios, probablemente por la difusión de éstos iones que migran desde la superficie de los minerales hasta una interfase en la que proceden a reaccionar formando hidróxidos [141], y a su vez Hughes *et al* [142], encontró que los desprendimientos de iones eran más frecuentes en minerales cuarzo-feldespáticos que en los ferro-magnesianos. También puede argumentarse el resultado

con la dureza global de la roca porque presenta una dureza menor respecto a los demás (5,8 según Mohs), sin embargo, el valor no difiere significativamente, infiriéndose que la reducción en el porcentaje de resistencia a la abrasión no se debe solo a la dureza de la roca.

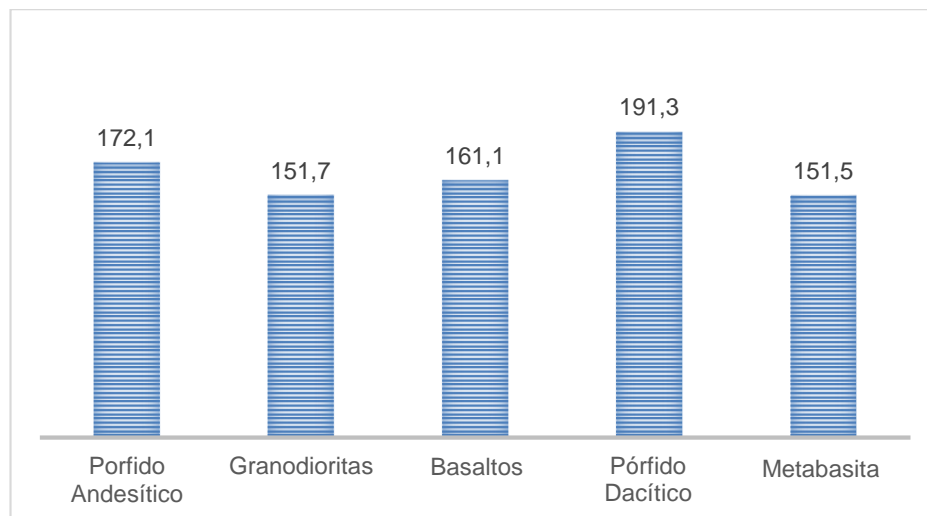
Adicionalmente las variedades plutónicas que tienen presencia de micas, en el caso de la granodiorita es la moscovita, tienden a tener menos resistencia a la abrasión que los que tienen una considerable proporción de hornblenda o augita [143].

El resto de las muestras analizadas tuvieron comportamientos similares, y lo que cabe resaltar es el comportamiento por parte de las metabasitas ya que se esperaba que al ser metamórfica su lajosidad redujera la resistencia a la abrasión, caso contrario a lo obtenido.

4.1.4.2 Resistencia a compresión

En la figura 4-22 se observa que tanto las metabasitas como las granodioritas tienen menor resistencia, lo cual era de esperarse porque tanto la roca metamórfica como la roca plutónica tienden a ser más frágiles debido a los planos de exfoliación o planos preferenciales y su gran tamaño de grano, por lo que son características estas rocas.

Figura 4-23: Resistencia a compresión de cilindros (MPa).



A su vez, los basaltos al ser una roca ígnea volcánica, la resistencia a compresión se ve disminuida a causa de su comportamiento básico, recordando que una roca ígnea entre más acida sea posee más dureza y lo contrario pasa cuando es más básica.

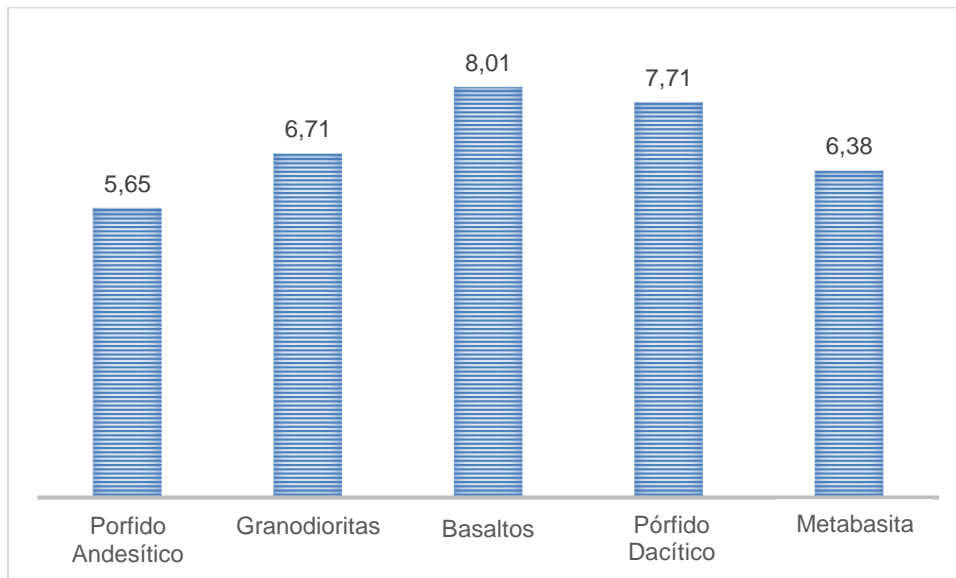
Los pórfidos tienen resultados altos a comparación de las otras debido a su textura porfídica en los cuales tienen fenocristales, y su proporción de minerales blandos es baja [143].

4.1.5 Caracterización química de los agregados

La solidez por sulfatos puede medir el número de partículas friables que hay entre el resto de las partículas estables de un árido, también aporta un acercamiento de la durabilidad del concreto debido a su posible producto de reacción: la etringita. El porcentaje de pérdida del material que se desprende al estar en contacto con una concentración alta de sulfatos muestra que tan solubles son los iones dentro de la roca y su facilidad de difundir en ella para poder reaccionar con los cationes metálicos.

En la figura 4-23 se puede observar la solidez de cada agregado frente a los sulfatos.

Figura 4-24: Solidez frente a los sulfatos (%).



Si en un instante de tiempo se observa una roca con un porcentaje de pérdida de masa alto dentro de un concreto estructural, específicamente la interfase entre el cemento y la

roca se puede dar la reacción que produce la etringita que al cristalizar puede ser dañina para el concreto.

Este reportado que la forma, el tamaño, la porosidad y la permeabilidad del árido está en gran correlación con la solidez por sulfatos. Por ende, corresponde con la caracterización del basalto en donde se presenciaba una textura vesicular al ser roca volcánica. De igual forma el pórfido dacítico al tener la mayor permeabilidad entre las demás rocas, la cual puede ser asociada a la absorción de esta, tiene también un porcentaje mayor de pérdida de material.

4.1.5.1 Reacción Álcali-agregados

En este sentido la composición química de estas rocas comunes en la cordillera central, en las inmediaciones del Volcán Nevado del Ruíz (NVR) contienen alto contenido de SiO_2 y $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ según Rayo-Rocha y Zuluaga [144]. En peso las siguientes son las características que poseen el grupo de rocas seleccionadas por los autores para determinar su composición petrográfica y química, para sus efectos, estos resultados se obtienen para determinar la composición de las rocas volcánicas y del proceso continuo en 1.8 Ma, desde que tiene actividad el VNR, de manera constante según sus resultados, lo que indica a su vez la constante en la composición mineralógica de estas rocas

Aunque las rocas de este estudio están ubicadas en el margen de 35 km de radio, en las inmediaciones del Nevado del Ruíz, sus resultados son importantes para especificar la composición mineral y química de las rocas como se puede detallar en la figura 4-24, que posiblemente tengan incidencia en la cuenca del río Chinchiná.

Figura 4-25: Composición porcentual de minerales en el grupo de rocas Andesíticas del complejo Nevado del Ruíz [144].

Elemento Muestra	Andesita de dos Piroxenos	Andesita con Hiperstena y Oxihornblenda	Andesita con Augita	Andesita con Augita	Andesita con Augita	Andesita con Augita
SiO ₂	61.17	61.11	61.79	63.22	64.03	60.84
Al ₂ O ₃	16.06	16.04	16.48	15.39	16.61	16.21
Fe ₂ O ₃	5.50	6.20	5.60	5.20	4.10	5.97
CaO	5.44	6.11	4.60	4.69	3.96	5.82
MgO	4.11	3.76	2.85	3.38	2.15	3.38
Na ₂ O	3.80	3.38	4.01	3.77	3.87	4.00
K ₂ O	2.77	1.98	3.19	3.28	3.32	2.33
TiO ₂	0.67	0.70	0.76	0.65	0.76	0.74
P ₂ O ₅	0.19	0.18	0.27	0.15	0.19	0.219
Mn	697	774	929	619	542	662
Sr	568	610	764	539	628	581
Cr	165	116	78	110	195	48
Zr	135	94	152	142	158	170
Zn	85	74	93	62	62	59
Rb	70	40	86	85	84	58
Ni	63	29	46	50	76	35
Co	24	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	16
Y	14	9	14	14	14	13
Nb	9	9	10	11	10	8.0

Como se observa en la figura 4-25, los elementos dominantes en la formación de las rocas son el oxígeno con un porcentaje superior en óxido peso y la sílice por encima del 59% y, en menor medida, el sodio y el potasio por debajo del 3% de óxido peso. Ésto define el contexto general de la química sufrida por las rocas ígneas de formación volcánica, en cuanto a la presión y la temperatura bajo las cuales se generan las características particulares de los distintos tipos de rocas que se describen en la tabla 4-26.

Figura 4-26: Descripción de elementos mayores en la superficie de la tierra que generan compuestos de rocas principales bajo presiones y temperaturas variables [145].

Elemento	ÓxidoPeso %	Porcentaje atómico
O	-----	60,8
Si	59,3	21,2
Al	15,3	6,4
Fe	7,5	2,2
Ca	6,9	2,6
Mg	4,5	2,4
Na	2,8	1,9
K	2,2	1,0
Total	98,5	98.5

Teniendo en cuenta que estos porcentajes pueden variar según las condiciones reinantes que imperen durante el proceso que dio lugar a la formación de la roca, así como también la actuación de fluidos y el ambiente tectónico en el cual se generaron.

TiO₂, H₂O, MnO y P₂O₅, son óxidos que se presentan comúnmente en bajas concentraciones, constituyendo los elementos menores de las rocas ígneas. El Cr₂O₃, puede ser otro óxido común, especialmente en las rocas ultramáficas, pero es típicamente un elemento traza en la mayoría de las rocas comunes. El Fe es el único elemento mayor o menor común, que se presenta con dos estados de valencia. La relación Fe³⁺/Fe²⁺, se incrementa con la fugacidad del oxígeno de los fundidos en equilibrio. Obsérvese en la tabla 4-26 que MgO y FeO-Fe₂O₃, decrecen desde la peridotita a la riolita, mientras que los álcalis aumentan. Ésto es lo común en las series evolutivas desde rocas básicas a ácidas.

Figura 4-27: Valores químicos de rocas ígneas representativas [145].

Óxidos	Peridotita	Basalto	Andesita	Riolita	Fonolita
SiO ₂	44,80	49,20	57,90	72,80	56,20
TiO ₂	0,19	1,84	0,87	0,28	0,62
Al ₂ O ₃	4,16	15,70	17,00	13,30	19,00
Fe ₂ O ₃	1,36	3,79	3,27	1,48	2,79
FeO	6,85	7,13	4,04	1,11	2,03
MnO	0,11	0,20	0,14	0,06	0,17
MgO	39,20	6,73	3,33	0,39	1,07
CaO	2,42	9,47	6,79	1,14	2,72
Na ₂ O	0,22	2,91	3,48	3,55	7,79
K ₂ O	0,05	1,10	1,62	4,30	5,24
H ₂ O ⁺	0,0	0,95	0,83	1,10	1,57
Total	99,36	99,02	99,27	99,51	99,20

Por otra parte, se tiene presencia en la cordillera occidental de una composición similar a la que poseen las rocas de la cordillera central, lo que nos demuestra una presencia de minerales tóxicos para la reacción ante los álcalis de los cementos en la preparación de concretos. Se estableció un análisis geoquímico al recolectar varias muestras de la granodiorita de farallones y se determinó su porcentaje en término de óxidos mayores como se observa en la figura 4-27 [146].

Figura 4-28: Composición química, óxidos mayores de la granodiorita [146].

Muestra	706515	706525	706724	706725	706727	706811	706458	119058	119059	119212
SiO ₂	61,36	64,95	61,94	59,44	64,39	56,25	67,76	52,07	62,78	52,14
Al ₂ O ₃	16,84	16,19	16,56	17,66	16,19	18,00	14,3	18,32	17,44	17,18
MnO	0,2	16,56	0,2	0,2	0,1	0,1	0,101	0,217	0,162	0,199
MgO	1,8	1,8	1,7	1,9	1,4	2,3	1,92	3,11	0,69	3,83
CaO	5,9	4,6	5,4	4,9	4,8	6,0	1,89	8,10	2,38	7,96
Na ₂ O	3,5	2,7	3,2	3,0	3,6	3,5	1,46	3,58	4,88	3,52
K ₂ O	2,4	1,3	3,0	2,6	2,7	4,6	3,84	2,94	5,65	3,0
TiO ₂	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,7	0,403	0,854	0,421	0,764
P ₂ O ₅	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4	0,14	0,750	0,19	0,57
Fe ₂ O _{3t}	6,47	6,15	5,73	6,47	4,82	7,95	5,72	9,74	4,69	9,99
LOI	0,3	1,8	1,0	3,2	0,5	0,2	3,22	0,17	0,57	0,53
A/CNK	0,88	1,15	0,91	1,06	0,94	0,84	1,43	0,78	0,94	0,74
Fe ₂ O ₃	3,24	3,08	2,87	3,24	2,41	3,98	2,86	4,87	2,35	5,00
FeO	2,91	2,77	2,58	2,91	2,17	3,58	2,57	4,38	2,11	4,50
Na ₂ O+K ₂ O	5,9	4	6,1	5,6	6,2	8,1	5,3	6,5	10,5	6,5
#Mg	43,38	44,35	45,12	44,95	43,27	43,74	47,76	46,51	28,60	51,08
A/I	1,90	1,07	1,91	2,02	1,71	3,60	1,26	4,23	3,13	4,20
A/NK	1,99	2,75	1,94	2,24	1,84	1,66	2,17	2,00	1,22	1,88
NK/A	0,50	0,36	0,51	0,45	0,545	0,605	0,465	0,50	0,82	0,532

La Granodiorita de Farallones se ubica en el grupo de plutones con dirección norte-sur que intruye el borde occidental del Complejo Cañas gordas entre los municipios de Pueblo Rico (Risaralda) y Frontino [147, 148].

A continuación, en la figura 4-28, se describe la geoquímica de algunas rocas del gabro de cerro frontino al norte de la cordillera occidental de Colombia.

Figura 4-29: Composición química, óxidos mayores, en rocas del Gabro de Cerro Frontino [147].

Clasificación petrográfica	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total
Clinopiroxenita biotítica	37.8	5.7	22.1	0.2	11.8	17	0.4	1.1	1.6	2.1	0.3	100
Gabro biotítico	40.3	10.6	17.2	0.2	10.1	16	0.7	1.2	1.4	1.1	0.8	99.3
Clinopiroxenita	40.7	4.1	22.9	0.3	11.9	18	0.3	0.1	1.5	0.1	<0.01	99.4
Clinopiroxenita	41.4	16	16	0.2	6.4	15	1.5	0.9	1.4	0.9	0.9	100
Microgabro biotítico	41.8	15.8	14.8	0.2	7.8	14	1	1.6	1.3	1	0.6	100
Gabro biotítico	42.1	8.9	21.6	0.2	8.9	14	1.1	1.8	1.4	0.3	0.7	101
Gabro biotítico	44.3	15.7	10.6	0.2	7.2	19	0.8	0.3	0.8	1.2	0.5	101
Clinopiroxenita	45.1	6.2	14.1	0.2	13.9	17	0.5	1.5	1.2	0.1	0.9	100
Clinopiroxenita	46.3	12.5	10.7	0.2	7	18	1.4	0.8	0.6	1	0.4	98.7
Diorita piroxénica	46.9	16.2	12.5	0.2	6.1	12	2.5	2	1.1	0.8	0.6	101
Leucogabro biotítico	47.5	17.7	10.3	0.2	4.8	11	2.9	1.9	1.1	0.9	1.1	99.2
Melagabro	48.7	7	12.2	0.4	9	20	0.9	0.4	0.5	0.7	0.3	100
Monzonita	49.9	15.1	11.9	0.2	4.6	10	3.3	2	1.1	0.6	0.7	99.3
Microgabro biotítico	50.7	16.4	10.5	0.2	4.2	9.1	2.9	3.9	0.9	0.8	0.7	100
Monzodiorita	51.2	17.9	9.5	0.2	3.6	8.1	3.1	3.1	0.9	0.8	0.8	99
Monzonita	54.1	19.1	6.9	0.1	2.4	6.3	4	4.5	0.7	0.5	1	99.7
Monzonita	54.4	18.9	6.9	0.1	2.2	5.4	4	5.6	0.7	0.5	0.6	99.4

Estas tablas muestran la importancia de los elementos mayores en las rocas que predominan en porcentaje en las muestras seleccionadas para este estudio, lo que queda por realizar en otra investigación es encontrar los porcentajes químicos que poseen de manera particular las rocas que se encuentran en la cuenca del río Chinchiná. Aunque las tablas anteriores demuestran los porcentajes que teóricamente poseen los compuestos de las rocas estudiadas, lo que significa que por aproximación se develan las circunstancias específicas que potencialmente podrían poseer los concretos preparados con estos agregados.

Ésto, sin embargo, no puede ser concluyente sin antes realizar un estudio específico sobre la reacción química que potencialmente puedan generar las rocas que se están estudiando en esta investigación. En el mismo sentido la reacción (RAS) que potencialmente puedan sufrir los concretos preparados con esta mezcla de agregados, que comúnmente se han utilizado en la construcción de edificaciones y obras civiles en general, en la zona de influencia del río Chinchiná, no necesariamente han demostrado que se den éstos efectos

sobre ellas, lo que nos puede, a su vez, demostrar que las construcciones desarrolladas con éstos materiales potencialmente dañinos no estén expuestos a los factores desencadenantes de la reacción como son la temperatura y la humedad, o inclusive otros minerales donde el Na y K pueden atacar desde el interior. En este sentido, Becker [149], advierte que, para una construcción preparada con estos materiales, se puede desvirtuar la tesis de la reacción a largo plazo solo cuando se dispone de antecedentes de obras con más de 10 a 15 años de servicio, que no poseen evidencias de expansiones y/u otros daños asociados con RAS construidas a partir de materiales componentes similares en condiciones de exposición similares o más exigentes que las que tendrá la nueva estructura a construir, no es necesario preocuparse por la posible futura RAS de la nueva estructura ya que el comportamiento de los materiales en condiciones reales resulta la mejor prueba de comportamiento, incluso superior a cualquier otro ensayo de laboratorio que intentemos realizar independientemente de la complejidad del mismo.

Puesto que la mejor prueba y forma de experimentación resulta ser el comportamiento de los materiales en condiciones reales, inclusive siendo superior a las pruebas de laboratorio. Ésto no puede justificar la utilización de materiales potencialmente perjudiciales, aunque si puede demostrar, su comportamiento en las condiciones reales de la construcción de acuerdo con su experiencia.

4.2 Evaluar mediante pruebas mecánicas el aporte de los agregados seleccionados en la producción de concreto estructural.

Luego de haber desarrollado el análisis petrográfico para identificar los tipos de rocas de las muestras evaluadas, se procedió a realizar unas pruebas de resistencia del concreto para cada uno de los materiales pétreos predominantes en porcentaje, de acuerdo con la metodología utilizada, los cuales se realizaron bajo las siguientes especificaciones técnicas que se muestran en la tabla 4-4:

Tabla 4-3: Materiales implementados en el diseño de mezcla.

Relación Agua-Material Cementante	0.43
Arena	Río Chinchiná
Cemento Argos (portland tipo 1)	8.37 Sacos
Asentamiento	125 mm
Agua	179.9 Kg/m ³
Tamaño Máximo Agregado Grueso	1"

4.2.1 Resistencia a compresión de cilindros de concretos

Estas resistencias fueron obtenidas a los 28 días para una resistencia de diseño de 27.58 MPa. Estas pruebas se practicaron en 5 grupos de rocas mayoritarias: Metabasitas, Basaltos, Granodioritas, Pórfido andesítico y dacítico. En la Tabla 4-5 se observan los resultados promedio de resistencia obtenidos:

Tabla 4-4: Promedio de resistencias obtenidas a los 28 días por tipo de roca.

Roca	Metabasita	Basaltos	Granodioritas	Pórfido andesítico	Pórfido dacítico
Resistencia a compresión (MPa)	28,32	22,52	27,87	32,78	31,25

El primer grupo de rocas que vamos a analizar son las Pórfido andesítico, las cuales poseen las siguientes características de resistencia, luego de las pruebas de compresión realizadas en fases diferentes en tres periodos de tiempo, teniendo en cuenta que el parámetro que varía es el secado del concreto preparado en los cilindros de 7, 14 y 28 días respectivamente. Se practicaron 6 pruebas en tres fechas de ensayos diferentes, de donde salen los siguientes análisis relevantes.

Del cuadro anterior los Basaltos presentaron una resistencia promedio a los 28 días inferior a la esperada en el diseño de mezcla, logrando apenas el 81.6%, lo que muestra que para mayor resistencia con este material pétreo sería necesario aumentar la cantidad de

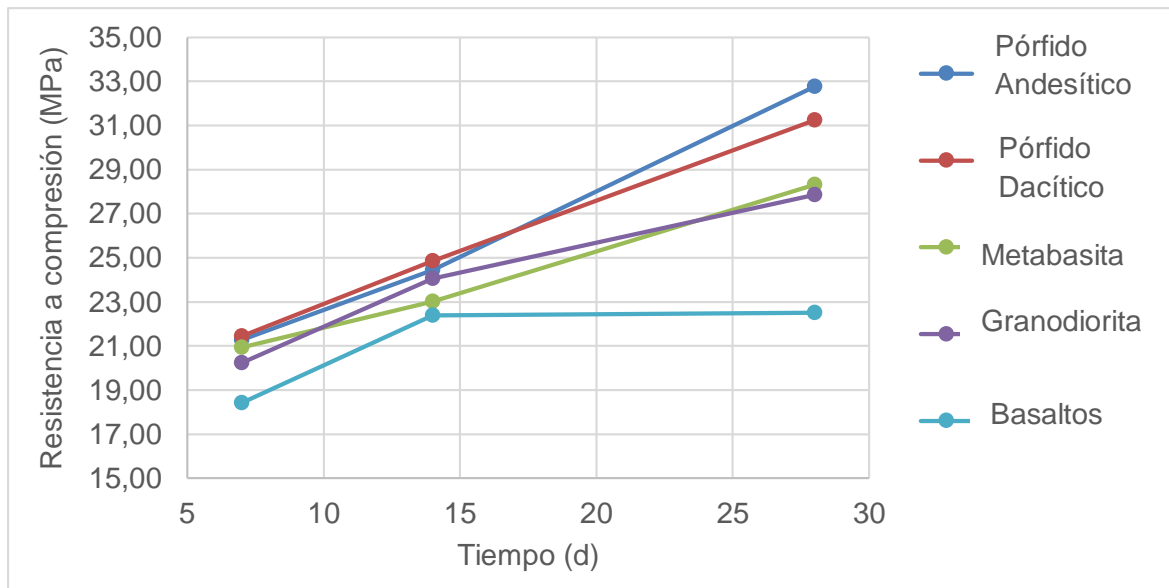
cemento o ser mezclado con otros materiales que le aporten la resistencia requerida; es importante anotar que si la cantidad de material es considerable se aumentaría el consumo de cemento, por lo tanto, aumentaría los costos de producción del concreto.

Por otra parte, se concluye que la resistencia de las metabasitas y las Granodioritas arrojaron resultados aproximados a los esperados en el diseño de mezclas propuesto, es decir, superior a los 27,58 MPa a los 28 días.

Los Pórfidos andesítico y dacítico resultaron con resistencias obtenidas del 18.5% y el 13.3% superior a la esperada, con lo que se podría concluir que éstos materiales de ser utilizados en mezclas de concreto hidráulico, la relación agua/cemento sería menor. Además, se determinó que los materiales predominantes en el triturado que se genera en la zona de extracción tienen un porcentaje superior de Pórfidos andesíticos y dacíticos que el resto de las muestras.

4.2.1.1 Desarrollo de la resistencia a compresión de cilindros de concretos por rocas

Se seleccionaron dos grupos de muestras a las que se realizaron pruebas de resistencia. El primer grupo al que se realizaron pruebas para determinar la resistencia a la compresión del concreto se realizó en tres distintas edades, para determinar su comportamiento en el tiempo. Por cada edad, se tomó un testigo para cada muestra, obteniendo así un promedio para cada una de las resistencias a los 28 días como se muestra en la figura 4-29, por cada tipo de roca muestreada, para las primeras 3 muestras a las que se realizó el procedimiento. Para el segundo grupo de rocas a las que se practicó los análisis de resistencia se obtuvieron unos resultados muy cercanos a los valores que ofrecieron las primeras pruebas, lo que demuestra su constancia y tendencia en frecuencia y promedios obtenidos.

Figura 4-30: Evolución de la resistencia a compresión.

4.2.1.1.1 Pórfido Andesítico

La prueba N°1 tuvo un esfuerzo de 21,66 MPa y un desarrollo del 77.4%, mientras la segunda prueba tuvo un esfuerzo 20,91 MPa y un desarrollo de 74.7%. En esta fecha se encuentran la capacidad de desarrollo por debajo de las proyecciones a 28 días. Para el día 14 las pruebas que se realizaron brindaron los siguientes resultados. La prueba N°3 presentó un esfuerzo de 24,17 MPa y un desarrollo de 86.4%, por su parte la prueba N°4 presentó un esfuerzo de 24,73 MPa y un desarrollo de 88.4%. En esta fecha ambas pruebas superan el esfuerzo y el desarrollo de la primera, pero siguen por debajo de la proyección a 28 días en ambos factores. Para el día 28 los valores que asumen las pruebas varían del siguiente modo; las pruebas N°5 tuvo un esfuerzo de 33,61 MPa y un desarrollo del 120,1%, por su parte la prueba N°6 tuvo un esfuerzo de 31,95 MPa y un desarrollo del 114,2%; en este sentido se superan las proyecciones de las fechas anteriores y el desarrollo de resistencia de diseño, por lo cual convierte a las rocas pórfido andesítico como el agregado con mejores características para la resistencia en la preparación de concretos y la reducción en la relación agua/cemento.

4.2.1.1.2 Pórfido Dacítico

En el tipo de roca de las Dacitas, a los 7 días después de la preparación de los cilindros, se obtuvo que el esfuerzo, en la prueba N°1 fue de 21,82 MPa, de acuerdo con la proyección a 28 días, apenas logra el 78% de desarrollo. En la prueba N°2 es de 21,07 MPa, mientras que su desarrollo significó del 75.3% con relación a la proyección esperada. Por su parte en el día 14 la prueba N°3 tiene la siguiente relación, con un esfuerzo de 24,64 MPa, su desarrollo aumento al 88.1%, mientras que la prueba N°4 con un esfuerzo de 25,07 MPa y un desarrollo en aumento de 89.6%. Con relación a las pruebas anteriores su desarrollo tuvo un aumento, pero no se supera la proyección a 28 días. Finalmente, las pruebas N°5 y N°6 tuvieron el siguiente comportamiento en el día 28; la primera tuvo un esfuerzo de 30,96 MPa y la segunda 31,55 MPa, respectivamente, con un aumento en los porcentajes de desarrollo el primero de 110,7% y de 112,8% el segundo, lo que indica un esfuerzo Psi constante y un desarrollo porcentual semejante, lo que indica la resistencia óptima de este grupo de rocas, y su fiabilidad en el rendimiento de la relación agua/cemento inclusive por debajo de lo exigido por la norma, semejante al caso de las rocas pórfido andesítico.

4.2.1.1.3 Metabasita

Las primeras pruebas realizadas a estas rocas fueron practicadas en el día 7, después de la preparación del concreto, obteniendo los siguientes resultados. La prueba N°1 con un esfuerzo de 21,18 MPa y un desarrollo efectivo del 75.7%, y la prueba N°2 con esfuerzo de 20,71 MPa y un desarrollo del 74%; y con el desarrollo del esfuerzo aún por debajo de la proyección a 28 días. Para el día 28 el siguiente es el comportamiento: La prueba N°3 tuvo un esfuerzo de 28,11 MPa y un desarrollo del 100.5%, mientras que la prueba N°4 tuvo un esfuerzo de 28,54 MPa y un desarrollo del 102%. El desarrollo de estas pruebas fue óptimo con relación a sobrepasar la resistencia de diseño 27,58 MPa, expresada en el 100%. Por lo tanto, supera las probabilidades de diseño planteadas para las pruebas.

4.2.1.1.4 Granodioritas

Con este conjunto de rocas se obtuvo los siguientes resultados para los 7 días posteriores a su preparación. La prueba del cilindro N°1 tuvo un esfuerzo de 20.48 MPa con un desarrollo del 73.2%, mientras el segundo tuvo un esfuerzo del 20,00 MPa con un desarrollo de 73.2%. Por otro lado, el cilindro N°2 tiene un esfuerzo de 20,00 MPa con un desarrollo de 71.5%. La primera tuvo un esfuerzo de 27,93 MPa con un desarrollo del 99.8%, mientras que la segunda tuvo un esfuerzo de 27,81 MPa y un desarrollo del 99.4%. El esfuerzo supera la resistencia de diseño planteada en 27,57 MPa, aunque su desarrollo manifiesta un valor muy próximo al 100%, lo que indica que es necesario revisar las relaciones de agua/cemento para aumentar su resistencia, al tiempo de mezclado con otros agregados con mejores características para brindarle mayores bondades a la resistencia del concreto que se prepare.

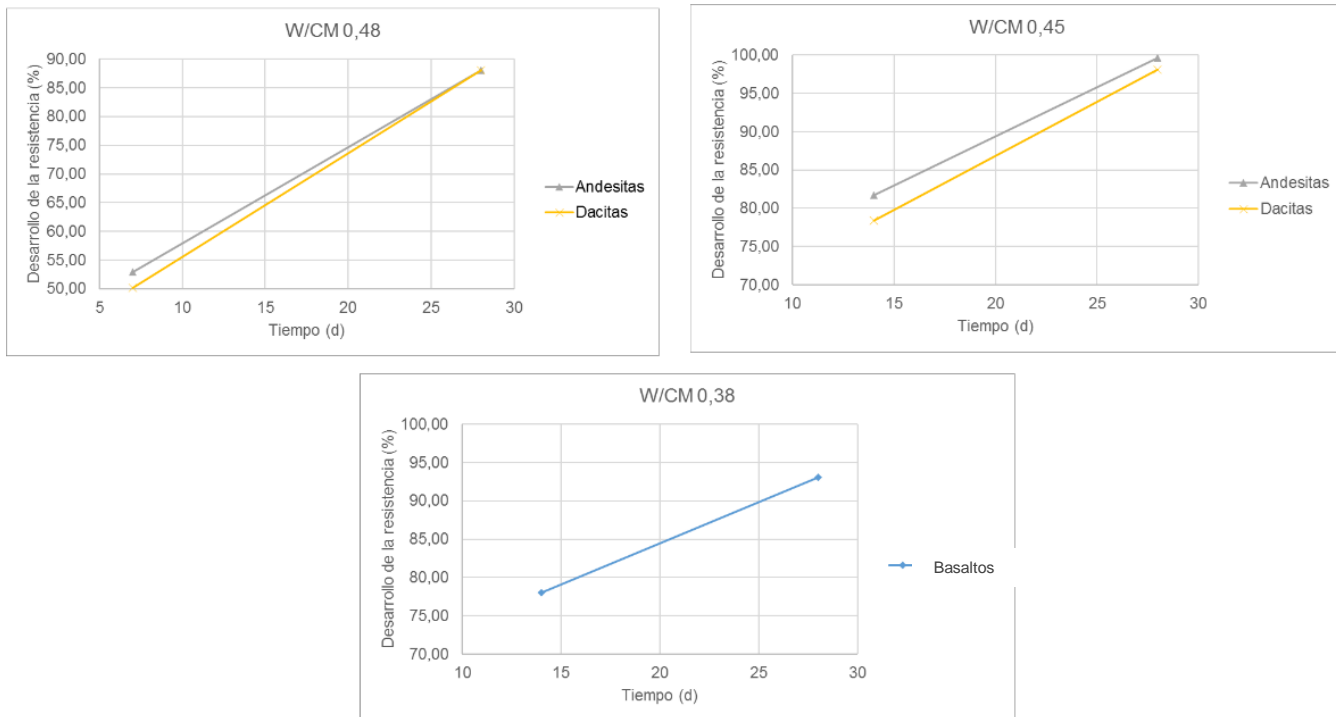
4.2.1.1.5 Basaltos

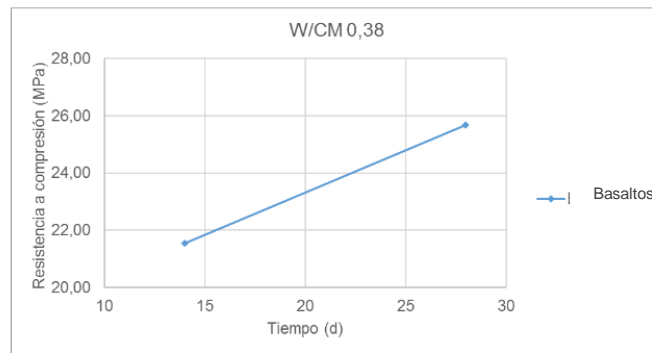
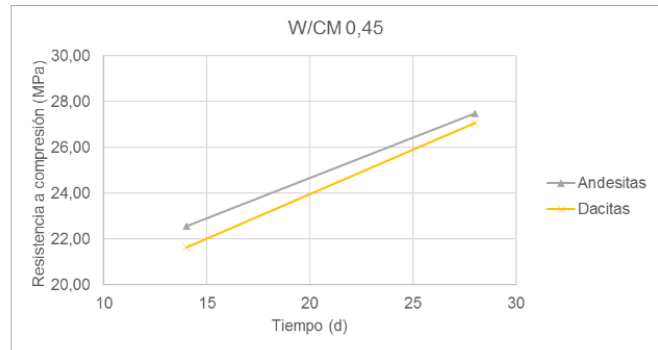
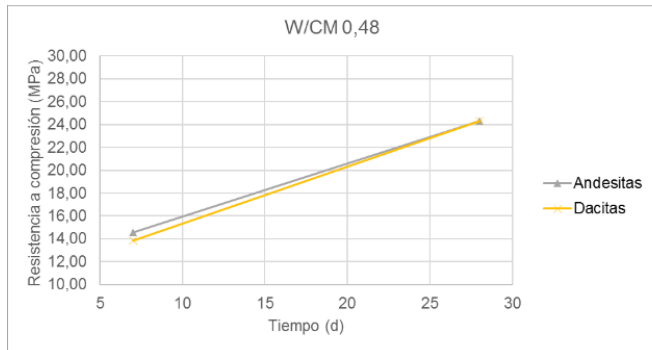
Este conjunto de rocas el comportamiento en la prueba de compresión de cilindros fueron así en el día 7. La primera prueba tuvo un esfuerzo de 17,83 MPa y un desarrollo de 63.7%, por su parte la segunda prueba tuvo un esfuerzo de 19,03MPa y un desarrollo del 68%. Estando por debajo de la proyección a 28 días. Para las pruebas ejecutadas en el día 14 el comportamiento de la prueba N°3 fue con un esfuerzo de 22,90 MPa y un desarrollo del 81.9%, mientras la prueba N°4 tuvo un esfuerzo de 21,88 MPa y un desarrollo del 78.2%. Siguiendo por debajo de lo proyectado, aunque aumentando su porcentaje de desarrollo, como se ve en el siguiente cuadro. El esfuerzo de la prueba N°1 fue de 22,36 MPa y un desarrollo del 79.9%, mientras la segunda prueba fue de un esfuerzo del 22,67 MPa y un desarrollo del 81.1%. Éstos agregados poseen baja calidad de acuerdo con sus características de resistencia, al no superar la proyección esperada a los 28 días, por lo que debe tenerse presente las relaciones de los materiales que se utilizan para la preparación de concreto, tanto en el aumento de la relación agua/cemento, como de mezclar los agregados con otros de mayores propiedades o inclusive aditivos en la mezcla.

4.2.1.2 Cambio en la resistencia a compresión de cilindros de concretos por relación W/CM

En este grupo se realizaron probetas de concreto manteniendo constantes todos los elementos de las mezclas de las pruebas anteriores, exceptuando la cantidad de cemento utilizado, ésto es manteniendo el cemento tipo portland 1 (Marca Argos) y variando sus dosificaciones, usando 180 litros de agua, y los mismos materiales pétreos, objeto de esta investigación. Por lo tanto, se obtuvieron resultados sobresalientes, en relación con las anteriores pruebas, los cuales brindaron resultados aproximados a los materiales que a los 28 días de los primeros ensayos. Para la resistencia esperada de (4000 Psi), no se modificaron en los tipos de rocas con menores valores, conservando su resistencia, por su parte en los pórfidos andesíticos y Dacíticos, en la medida que se disminuye la cantidad de cemento de 8 y 7.5 sacos, y en los Basaltos aumentando la cantidad de cemento a 9.5 sacos, se obtuvieron los siguientes resultados que se observan en la figura 4-30.

Figura 4-31: Porcentaje del desarrollo de la resistencia a compresión.





5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El agregado pétreo procede esencialmente de las cuencas altas y medias de los ríos Claro y Chinchiná que nacen en el nevado del Ruiz, sitio desde donde inicia el arrastre de los materiales luego desprende y recibe materiales de las otras zonas que atraviesan, (Complejo Quebradagrande, Complejo Cajamarca, Complejo Arquía, etc.), pero éstos últimos son materiales que al sufrir sedimentación metamorfismo se convierten en rocas que se desintegran fácilmente aportando gran cantidad de finos y arenas mientras los provenientes directamente del nevado del Ruiz son rocas asociadas a Andesitas y Dacitas, que componen gran parte de los materiales pétreos objeto de esta investigación.

Para el área total de influencia se encuentra que el porcentaje de cada una de las litologías presentes en la cuenca del río Chinchiná, comenzando desde la parte más distal para litologías asociadas al complejo volcánico Ruiz-Tolima-Cerro Bravo se presentan en un 30%, seguido del Complejo Cajamarca en un 25%, Complejo Quebradagrande en un 25%, el cinturón gabrónico Chinchiná – Santa Rosa en un 5% y por último el Complejo Arquía en un 15%.

El análisis macroscópico por superficie de las muestras con la metodología del reticulado arrojó unos porcentajes promedio de 65,0% rocas ígneas, un 25,0% de rocas metamórficas y un 10,0% de sedimentarias, estos análisis se hicieron con tamaños de rocas que oscilaban entre 5 cm y 15 cm.

El análisis de los materiales triturados para calcular los volúmenes arrojó resultados que involucran los tres tipos de rocas con porcentajes promedio de 78,0% rocas ígneas, un 20,5% de rocas metamórficas y un 1,5% de rocas sedimentarias, teniendo mayores porcentajes de cada grupo fueron: 50% andesita, 12% dacita, 5% granodiorita, 5% basaltos y 5% metabasitas.

La variación en los porcentajes de los tipos de rocas obedece a que para el triturado de manera aleatoria se mezclaba material de gran tamaño, y éstos en su mayoría son bloques de material ígneo procedente de la cuenca del río claro, ahora la procedencia de este material es de cuerpos volcánicos del complejo volcánico Ruiz – Cerro Bravo - Tolima.

Los análisis mineralógicos indican que las rocas ígneas tienen variaciones en cuarzo que van desde cuarzo 5-35%, el feldespato potásico varía entre 20-80% y las plagioclasas sódicas 25-45%, lo que indica en su gran mayoría rocas formadas de magmas intermedios a ácidos. Para las rocas sedimentarias no se realizaron análisis petrográficos por ser un porcentaje bajo.

Se encontró mediante XRD que las rocas en conjunto son ricas en Na, K, Mg, Fe, Si, Al, Ca. Además, esta técnica junto petrografía como técnica complementaria ayuda a la caracterización completa de las fases minerales presentes en las rocas.

La correlación entre XRD y la petrografía fue hallada, siendo ensayos complementarios para poder especificar con mayor detalle el sistema cristalino de las muestras. Por lo anterior se recomienda que para poder identificar satisfactoriamente las fases cristalinas y los componentes en una roca se debería realizar como ensayo para los diseños.

La trituración de la roca ayuda a la adhesión entre la pasta de cemento y el agregado para la fabricación de concretos debido a la angularidad cubica y textura irregular generadas en el proceso.

Se encontró que los valores para el porcentaje de absorción aumentaban en el pórfido andesítico y dacítico, siendo las dos rocas volcánicas con textura porfírica similar. Las metabasitas y los pórfidos andesíticos superaban el límite superior de granulometría, probablemente por tener grandes cristales, fenocristales o láminas cristalinas.

Se obtuvo la dureza de acuerdo con una metodología implementada por Atkinson, el cual correlaciona la petrografía y XRD para encontrar los minerales, calculando así una dureza total de la roca. La de menor dureza fue la metabasita, seguidos por las granodioritas y el

pórfido andesítico con valores similares, y por último los basaltos y el pórfido dacítico. Los resultados obtenidos tenían tendencia y relativamente baja desviación.

El porcentaje de abrasión se ve altamente influenciado por características mineralógicas como su contenido en silicatos, además de iones como el Na^+ y K^+ . Sin embargo, no solo los porcentajes mineralógicos influyen en esta propiedad, también la dureza del material, el tamaño de los cristales y la textura. Las granodioritas presentaron el mayor desgaste de todas las muestras. Las demás rocas tuvieron comportamientos similares entre ellas.

La resistencia a compresión estuvo muy correlacionada con aspectos físicos de las rocas tales como la textura, naturaleza, porosidad y fragilidad. Las de menor resistencia fueron las metabasitas, las granodioritas y los basaltos.

Los basaltos por su textura vesicular tuvieron el mayor porcentaje de pérdida de masa por solidez de sulfatos ya que este era muy permeable. Factor a tener en cuenta para la durabilidad del concreto.

Por parte de la reactividad de las rocas encontrada en literatura en la figura 5-1 [150], se puede observar que la andesita y la dacita tienen gran reactividad reportada, por lo que se recomendaría realizar el ensayo tradicional para evaluar la reactividad con los álcalis.

Figura 5-1: Rocas con reactividad álcali-sílice [150].

Reacción Álcali Sílice
Andesitas, Argillitas, Calcedonia, Ciertas Calizas, Ciertas, Dolomitas, Cristobalita, Cuarzita, Cuarzosa, Dacitas, Esquistos, Filita, Gneiss Granítico, Ópalo, Pizarras Opalinas, Pizarras, Silíceas, Riolitas, Tridimita, Vidrio Silíceo, Vidrio Sintético

Al evaluar el desempeño de los materiales en el concreto se encuentra que a los 28 días todos los concretos han superado el 100% de la resistencia esperada, siendo los mejores el pórfido andesítico y el dacítico.

De acuerdo con los ensayos realizados se halló que los pórfidos andesíticos y dacíticos son las rocas que mejores características presentan para fabricar concretos estructurales, y como estas rocas tienen el mayor porcentaje de la cuenca medio del Río Chinchiná, los materiales extraídos son aptos para el uso de concretos y de calidad relativamente alta. Del mismo modo las granodioritas y las metabasitas presentan las características menos adecuadas para hacer concreto.

Bibliografía

1. Kumar, S., Gupta, R. C., & Shrivastava, S. (2016). Strength, abrasion and permeability studies on cement concrete containing quartz sandstone coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 125, 884-891. A. Neville, J. Brooks, *Concrete Technology*, Longman, England, 1993.
2. Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). *Concrete technology*.
3. Meddah, M. S., Zitouni, S., & Belâabes, S. (2010). Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(4), 505-512.
4. Wu, K. R., Chen, B., Yao, W., & Zhang, D. (2001). Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1421-1425.
5. Donza, H., Cabrera, O., & Irassar, E. F. (2002). High-strength concrete with different fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, 32(11), 1755-1761.
6. Sengul, O., Tasdemir, C., & Tasdemir, M. A. (2002). Influence of aggregate type on mechanical behavior of normal-and high-strength concretes. *Materials Journal*, 99(6), 528-533.
7. de Lopez, L. G. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Universidad Nacional de Colombia.
8. Pereira, C. G., Castro-Gomes, J., & de Oliveira, L. P. (2009). Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 602-608.
9. Aïtcin, P. C., & Mehta, P. K. (1990). Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials Journal*, 87(2), 103-107.

10. Cetin, A., & Carrasquillo, R. L. (1998). High-performance concrete: influence of coarse aggregates on mechanical properties. *Materials Journal*, 95(3), 252-261.
11. Özturan, T., & Çeçen, C. (1997). Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. *Cement and Concrete Research*, 27(2), 165-170.
12. Bérubé, M. A., & Fournier, B. (2004, October). Alkalis releasable by aggregates in concrete: significance and test methods. In *Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (Vol. 1, pp. 130-1)*. Beijing, China.
13. Canadian Standards Association. (2000). Standard practice to identify degree of alkali-reactivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete. *A23*, 2-27.
14. Basheer, L., Kropp, J., & Cleland, D. J. (2001). Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and building materials*, 15(2), 93-103.
15. DE GUZMAN, D. A. S. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Pontificia Universidad Javeriana.
16. Fookes, P. G. (1980). An introduction to the influence of natural aggregates on the performance and durability of concrete. *Quarterly journal of engineering geology and hydrogeology*, 13(4), 207-229.
17. Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An introduction to composite materials*. Cambridge university press.
18. Li, Z. (2011). *Advanced concrete technology*. John Wiley & Sons.
19. Jones, K. (1999). *Density of Concrete*. The Physics Factbook.

-
20. Alsayed, S. H., & Amjad, M. A. (1994). Effect of curing conditions on strength, porosity, absorptivity, and shrinkage of concrete in hot and dry climate. *Cement and Concrete Research*, 24(7), 1390-1398.
 21. Scripture Jr Edward, W. (1942). U.S. Patent No. 2,275,272. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
 22. Niño P.A., Alvarado Y. A., Osorio D., Castaño J.O., Nuñez A.M. (Septiembre 2015). INFLUENCIA DEL RÉGIMEN DE CURADO CUAD. En F. Branco (Presidencia), XIII Congreso Latinoamericano de Patología de las Construcciones y XV Congreso de Control de Calidad en la Construcción Congreso llevado a cabo en Lisboa, Portugal.
 23. ABRAMS, D. A. (1919). Design of concrete mixtures (Vol. 1). Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute.
 24. Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Kerkhoff, B. (2002). Design and control of concrete mixtures (Vol. 5420, pp. 60077-1083). Skokie, IL: Portland Cement Association.
 25. Skalny, J., & Roberts, L. R. (1987). High-Strength Concrete. *Annual Review of Materials Science*, 17(1), 35-56.
 26. Aitcin, P. C. (2003). The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement and concrete composites*, 25(4), 409-420.
 27. Laskar, A. I. (2011). Mix design of high-performance concrete. *Materials Research*, 14(4), 429-433.
 28. Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., & Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, 101, 741-751.

29. Redaelli, D., & Muttoni, A. (2007). Tensile behaviour of reinforced ultra-high performance fiber reinforced concrete elements. In fib Symposium, Dubrovnik 2007 (No. EPFL-CONF-116127, pp. 267-274). fib Symposium, Dubrovnik 2007.
30. Russell, H. G., & Graybeal, B. A. (2013). Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community (No. FHWA-HRT-13-060).
31. Government of the United Kingdom, Health and Safety Executive, "Cement - Construction Information Sheet No 26 (revision 2)", first published 12/02, <http://www.hse.gov.uk/pubns/cis26.pdf>, retrieved June 16, 2014.
32. Aïtcin, P. C. (2000). Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. *Cement and Concrete research*, 30(9), 1349-1359.
33. Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*.
34. Shetty, M. S. (2005). *Concrete Technology Theory & Practice*, Published by S. CHAND & Company, Ram Nagar, New Delh.
35. ASTM C. (2004). 845: Standard specification for expansive hydraulic cements. ASTM International, West Conshohocken
36. ASTM C. (2011). 1157/1157M-11: Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. ASTM International, West Conshohocken.
37. ASTM C. (2015). 618-15: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken.
38. ASTM C. (2016). 989/989M-16e1: Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars. ASTM International, West Conshohocken.

-
39. ASTM C. (2015). 1249-15: Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. ASTM International, West Conshohocken.
 40. ICONTEC. (2003). 1362: CEMENTO PORTLAND BLANCO. NTC-1362. Bogotá.
 41. Bukowski, J. M., & Berger, R. L. (1979). Reactivity and strength development of CO₂ activated non-hydraulic calcium silicates. *Cement and Concrete Research*, 9(1), 57-68.
 42. Instituto Nacional de Vías (2012). Normas y Especificaciones Técnicas Generales de Construcción de Carreteras. INVIAS 2012. Bogotá.
 43. ASI, A. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10. Bogotá.
 44. ASTM, C. (2005). 595-03: Standard specification for blended hydraulic cements. *Annual book of ASTM standards*, 4.
 45. Kucche, M. K., Jamkar, S. S., & Sadgir, P. A. (2015). Quality of water for making concrete: a review of literature.
 46. UNAM, I. D. (1994). Manual De Tecnología del Concreto. Mexico: Limusa Editores.
 47. Merritt, F. (1993). Manual del Ingeniero Civil, 3era Edición, Ed.
 48. Ruiz, A.P., Fava, C. (2000). Estudio de fuentes de agregados de la República Argentina. Anticipándose a las exigencias respecto de la reacción álcalis – agregado. Centro Técnico Loma Negra.
 49. Turanli, L., Bektas, F., Monteiro, P.J.M. (2003). Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali – silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 1539-1542.

50. Salcedo, L. O. (2008). Conceptos Generales Sobre Los Agregados.
51. Matias, D., De Brito, J., Rosa, A., & Pedro, D. (2013). Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates–Influence of the use of superplasticizers. *Construction and building materials*, 44, 101-109.
52. ASTM C294-05, Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005, www.astm.org.
53. Collis, L., & Smith, M. R. (Eds.). (2001). *Aggregates: sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes*. Geological Society.
54. ICONTEC. (2000). 174: ESPECIFICACIONES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO. NTC-174. Bogotá.
55. BS EN 932-1. (1997). Tests for general properties of aggregates. Methods for sampling. European Standard.
56. BS EN 933-3. (2012). Tests of geometrical properties of aggregates. Determination of particles shape. Flakiness index. European Standard.
57. BS EN 12620. (2013). Aggregates for concrete. European Standard.
58. BS 882. (1992). Specification for aggregates from natural sources for concrete. British Standard.
59. B. PENKALA, R. KRZYWOBLOCKALAUROW and J. PIASTA. (1972). The behaviour of dolomite and limestone and mortars. *Warsaw Technical University*, 2, 141-155.

-
60. Regan, P. E., Kennedy-Reid, I. L., Pullen, A. D., & Smith, D. A. (2005). The influence of aggregate type on the shear resistance of reinforced concrete. *Structural Engineer*, 83(23-24), 27-32.
 61. Walker, S., & Bloem, D. L. (1956). Studies of flexural strength of concrete, part 1: Effects of different gravels and cements. *Nat. Ready-mixed Concr. Assoc., Joint Res. Lab. Pub.*
 62. Woolf, D. (1966). Toughness, hardness, abrasion, strength, and elastic properties. In *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM International.
 63. Soongswang, P., Tia, M., & Bloomquist, D. (1991). Factors affecting the strength and permeability of concrete made with porous limestone. *Materials Journal*, 88(4), 400-406.
 64. ASTM C131-06, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, www.astm.org.
 65. ROAD RESEARCH LABORATORY. (1959). Roadstone test data presented in tabular form. London.
 66. Bijen, J. (2003). *Durability of engineering structures: Design, repair and maintenance*. Elsevier.
 67. Hilsdorf, H., & Kropp, J. (Eds.). (2004). *Performance criteria for concrete durability (Vol. 12)*. CRC Press.
 68. Gillott, J. E., & Rogers, C. A. (1994). Alkali–aggregate reaction and internal release of alkalis. *Magazine of Concrete Research*, 46(167), 99-112.
 69. GUZMAN, O., & BALDION, J. (2003). El clima en la sede principal del centro nacional de investigaciones de café Chinchiná Caldas.

70. Agudelo Gaviria, A. F., Castañeda Tabares, P. A., & Rojas Salazar, L. M. (2009). Diseño del manual de procesos, procedimientos y funciones para la distribuidora e importadora CI Coffee INN de la ciudad de Pereira (Risaralda) (Bachelor's thesis, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira).
71. Toussaint, J. F., & Restrepo, J. J. (1978). Edad cretácea de una anfibolita granatífera de Pijao, Quindío. *Publ. Esp. Geol. Univ. Nacional*, (17), p1-2.
72. Naranjo, J. A., Ramírez, P., Clavero, J., & Hauser, A. REMOCIONES EN MASA CAUSADAS POR LLUVIAS TORRENCIALES, JUNIO 26–27, 2005 CONCEPCIÓN, VIII REGIÓN.
73. Maya, M., & González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Bol. Geol. INGEOMINAS*, 35(2), 3.
74. Nivia, A., Galvis, N., & Maya, M. (1996). Mapa Geológico de Colombia—Escala 1: 100 000, Plancha 242—Zarzal.
75. CALLE, B., & GONZÁLEZ, H. (1980). Geología y geoquímica de la Plancha 166, Jericó Ingeominas, Informe 1822, 232 p.
76. Álvarez, J. A. (1987). Geología del Complejo Ofiolítico de Pacora y secuencias relacionadas de arco de islas (Grupo Quebradagrande) Colombia Medellín.
77. Naranjo, J. L., & Ríos, P. A. (1989). Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. *Revista Universidad de Caldas*, 10(1-3), 113.
78. Naranjo, J. L. (2005). Modelo de evolución morfotectónica del Sistema de Fallas de Romeral a nivel regional. Universidad de Caldas. Manizales.
79. GARCÍA, J. I., URIBE, L. M., & DE GEOLOGÍA, P. R. O. G. R. A. M. A. (2005). PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE LA MIGMATITA DE MANIZALES ENTRE EL CERRO MORRO GORDO Y EL RÍO CHINCHINÁ, AL OCCIDENTE DE MANIZALES (CALDAS).

-
80. MAYA, M. (2003). Zonas potenciales para materiales de construcción en los alrededores de Medellín, Colombia. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear. Ministerio de Minas y Energía. Santafé de Bogotá.
81. OLARTE, O. L. (2006). Diseño de un modelo de estudio y gestión de un título minero para materiales de arrastre durante la etapa de exploración. Tesis Universidad Industrial de Santander.
82. ASTM C33 / C33M-16e1, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
83. Scasso, R. A. L., & Carlos, O. (1997). Petrología y diagénesis de rocas clásticas (No. 552.54 SCA).
84. Benammi, M., Centeno-García, E., Martínez-Hernández, E., Morales-Gámez, M., Tolson, G., & Urrutia-Fucugauchi, J. (2005). Presence of dinosaurs in the Barranca Los Bonetes, southern Mexico (Tiquicheo Region, Michoacán State), and its chronostratigraphic implications. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(3), 429-435.
85. Folk, R. L. (1980). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company.
86. Dorado, A. C. (2015). *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. Ediciones Paraninfo, SA.
87. Hilsdorf, H. K. (1989). Durability of concrete-a measurable quantity?. In DURABILITY OF STRUCTURES. IABSE SYMPOSIUM, SEPTEMBER 6-8 1989, LISBON (IABSE REPORT VOLUME 57/1).
88. Fagerlund, G. (1980). Durability of concrete structures. (Swedish) G. Fagerlund, CBI Report, (4).

89. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., & Fardis, M. N. (1991). Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete. *Materials Journal*, 88(2), 186-196.
90. Rodway, L. E. (1985). Durability of concrete. *Cement, concrete and aggregates*, 7(1), 43-48.
91. Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, 12(4), 411-421.
92. Kearsley, E. P., & Wainwright, P. J. (2001). Porosity and permeability of foamed concrete. *Cement and concrete research*, 31(5), 805-812.
93. Brown, P. W. (1991). Porosity/permeability relationships. *Materials science of concrete II*, 83-109.
94. RILEM, C. (1984). 18, Measurement of hardened concrete carbonation depth, RILEM draft recommendation. *Materials and Structures*, 17, 435-40.
95. Beddoe, R. E., & Dorner, H. W. (2005). Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 35(12), 2333-2339.
96. Biczok, I., & Blasovszky, N. (1964). Concrete corrosion and concrete protection.
97. Rombén, L. (1980). Aspects on testing methods for acid attacks on concrete-further experiments (No. CBI-F--9-79). Swedish Cement and Concrete Research Inst.
98. WANG, K., MA, B. G., LONG, S. Z., & LUO, Z. (2009). Acid rain attack on different variety of cement concretes. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2, 002.
99. O'Connell, M., McNally, C., & Richardson, M. G. (2010). Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review. *Cement and Concrete Composites*, 32(7), 479-485.

-
100. Fattuhi, N. I., & Hughes, B. P. (1988). The performance of cement paste and concrete subjected to sulphuric acid attack. *Cement and Concrete Research*, 18(4), 545-553.
 101. Zivica, V., & Bajza, A. (2001). Acidic attack of cement based materials—a review.: Part 1. Principle of acidic attack. *Construction and Building materials*, 15(8), 331-340.
 102. Mehta, P. K. (1983). Mechanism of sulfate attack on portland cement concrete—Another look. *Cement and Concrete Research*, 13(3), 401-406.
 103. Stanton, T. E. (2008). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate (No. SP-249-1).
 104. Katayama, T. (1992, July). A critical review of carbonate rock reactions—is their reactivity useful or harmful. In *Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, London (pp. 508-518).
 105. Mingshu, T. (1992). CLASSIFICATION OF ALKALI-AGGREGATE REACTION [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 3, 007.
 106. Ponce, J. M., & Batic, O. R. (2006). Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1148-1156.
 107. Powers, T. C., & Steinour, H. H. An Interpretation of Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction: I. The Chemical Reactions and Mechanism of Expansion. *Journal*, 497.
 108. Gu, P., Xu, Z., Xie, P., & Beaudoin, J. J. (1993). Application of AC impedance techniques in studies of porous cementitious materials:(I): Influence of solid phase and pore solution on high frequency resistance. *Cement and Concrete Research*, 23(3), 531-540.

109. Swamy, R. N. (Ed.). (2002). *The alkali-silica reaction in concrete*. CRC Press.
110. Diamond, S., & Thaulow, N. (1974). A study of expansion due to alkali—silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, 4(4), 591-607.
111. Diamond, S. (1975). A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms 1. Alkalies in cements and in concrete pore solutions. *Cement and Concrete Research*, 5(4), 329-345.
112. Helmuth, R., Stark, D., Diamond, S., & Moranville-Regourd, M. (1993). Alkali-silica reactivity: an overview of research. *Contract*, 100, 202.
113. Gillott, J. E. (1986). Alkali-reactivity problems with emphasis on Canadian aggregates. *Engineering Geology*, 23(1), 29-43.
114. ANcnr, R. J., & Frcnncn, L. W. (1990). Structural variation associated with compositional variation and order-disorder behavior in anorthite-rich feldspars. *American Mineralogist*, 7(5), 150-162.
115. Bish, D. L., & Von Dreele, R. B. (1989). Rietveld refinement of non-hydrogen atomic positions in kaolinite. *Clays and Clay Minerals*, 37(4), 289-296.
116. Onnnrr, R. (1991). Crystal chemistry of clinopyroxenes from mantle eclogites: a study of the key role of the M2 site population by means of crystal-structure refinement. *American Mineralogist*, 76, 1141-1152.
117. Bonlbn, S. R. (1980). Crystal chemistry of a metamorphic biotite and its significance in water barometry.

-
118. Jackson, W., & West, J. (1931). The Crystal Structure of Muscovite— $\text{KA}2(\text{A} \text{ISi}3) \text{O}10 (\text{OH}) 2$. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 76(1-6), 211-227.
119. Meneghinello, E., Alberti, A., & Cruciani, G. (1999). Order-disorder process in the tetrahedral sites of albite. *American Mineralogist*, 84(7-8), 1144-1151.
120. Machatschki, F. (1936). Kristallstruktur von Tiefquarz. *Fortschritte der Mineralogie*, 20(1-6), 45-47.
121. Chao, S. H., Hargreaves, A., & Taylor, W. H. (1940). The structure of orthoclase. *Mineralogical Magazine*, 25(168), 498-512.
122. Thompson, R. M., & Downs, R. T. (2008). The crystal structure of diopside at pressure to 10 GPa. *American Mineralogist*, 93(1), 177-186.
123. Bigi, S., & Brigatti, M. F. (1994). Crystal chemistry and microstructures of plutonic biotite. *American Mineralogist*, 79(1-2), 63-72.
124. Benusa, M. D., Angel, R. J., & Ross, N. L. (2005). Compression of albite, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$. *American Mineralogist*, 90(7), 1115-1120.
125. Allan, D. R., & Angel, R. J. (1997). A high-pressure structural study of microcline (KAlSi_3O_8) to 7 GPa. *European Journal of Mineralogy*, 263-276.
126. Mancini, F., Sillanpää, R., Marshall, B., & Papunen, H. (1996). Magnesian hornblende from a metamorphosed ultramafic body in Southwest Finland; crystal chemistry and petrological implications. *The Canadian Mineralogist*, 34(4), 835-844.
127. Phillips, M. W., Colville, A. A., & Ribbe, P. H. (1971). The crystal structures of two oligoclases: A comparison with low and high albite. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 133(1-6), 43-65.

128. Gabe, E. J. (1973). A reinvestigation of the epidote structure: Confirmation of the iron location. *Amer. Mineral.*, 58, 218-223.
129. Poppr, L. (1991). Effect of Ti substitution in biotite-IM crystal chemistry. *American Mineralogist*, 76, 1174-1183.
130. Wainwright, J. E., & Starkey, J. (1971). A refinement of the structure of anorthite. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 133(1-6), 75-84.
131. Yang, H., & Ghose, S. (1995). High temperature single crystal X-ray diffraction studies of the ortho-proto phase transition in enstatite, Mg₂Si₂O₆ at 1360 K. *Physics and Chemistry of Minerals*, 22(5), 300-310.
132. Ottonello, G., Princivalle, F., & Della Giusta, A. (1990). Temperature, composition, and f_{O2} effects on intersite distribution of Mg and Fe²⁺ in olivines. *Physics and Chemistry of Minerals*, 17(4), 301-312.
133. Gualtieri, A. F. (2000). Accuracy of XRPD QPA using the combined Rietveld–RIR method. *Journal of Applied Crystallography*, 33(2), 267-278.
134. Prewitt, C. T., Sueno, S., & Papike, J. J. (1976). The crystal structures of high albite and monalbite at high temperatures. *American Mineralogist*, 61(11-12), 1213-1225.
135. Hazen, R. M., Finger, L. W., Hemley, R. J., & Mao, H. K. (1989). High-pressure crystal chemistry and amorphization of α -quartz. *Solid State Communications*, 72(5), 507-511.
136. Bosi, F., Hålenius, U., & Skogby, H. (2009). Crystal chemistry of the magnetite-ulvöspinel series. *American Mineralogist*, 94(1), 181-189.

-
137. Fayos, J. (1999). Possible 3D carbon structures as progressive intermediates in graphite to diamond phase transition. *Journal of Solid State Chemistry*, 148(2), 278-285.
138. Conca, J. L., & Cubba, R. (1986, April). Abrasion resistance hardness testing of rock materials. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 23, No. 2, pp. 141-149). Pergamon.
139. Atkinson, T., Cassapi, V. B., & Singh, R. N. (1986). Assessment of abrasive wear resistance potential in rock excavation machinery. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 4(2), 151-163.
140. Knight, B. H. (1935). *Road aggregates: their uses and testing* (Vol. 3). E. Arnold.
141. Hallberg, S. (1950). *Adhesion of bituminous binders and aggregates in the presence of water* (Vol. 78). Haeggström.
142. Hughes, R. I., Lamb, D. R., & Pordes, O. (1960). Adhesion in bitumen macadam. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 10(11), 433-444.
143. Smith, M. R., & Collis, L. (1994). Áridos. Áridos naturales y de machaqueo para la construcción.
144. Rayo-Rocha, L., & Zuluaga, C. A. (2011). Procesos magmáticos en el Volcán Nevado del Ruiz: Un análisis cuantitativo textural. *Boletín de Geología*, 33(2).
145. Toselli, A. J. (2009). *Elementos básicos de petrología ígnea*. Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO).

146. Zapata García, G., & Rodríguez García, G. (2013). Petrografía, geoquímica y edad de la Granodiorita de Farallones y las rocas volcánicas asociadas. *Boletín de Geología*, 35(1), 81-96.
147. Rodríguez, G., & Zapata, G. (2012). Características del plutonismo Mioceno superior en el segmento norte de la Cordillera Occidental e implicaciones tectónicas en el modelo geológico del noroccidente colombiano. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (31).
148. Rodríguez-García, G., & Bermúdez-Cordero, J. G. (2015). Petrography, geochemistry and age of Cerro Frontino Gabro. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (38), 25-40.
149. Becker, Edgardo A. 2003. Reacción Álcali-sílice. Introducción al conocimiento y recomendaciones. Líder de Asesoría Técnica. Revista LOMA NEGRA C.I.A.S.A.
150. RIVVA, E., HARMAN, J., PASQUEL, E., BADOINO, D., & ROMERO, A. Tecnología del Concreto. *Capítulo Peruano ACI*.
151. MAYA, M.; GONZÁLEZ, H. 1995. Unidades Litodémicas en la Cordillera Central de los Andes Colombianos. Ingeominas, Bol. Geol., 35 (2 - 3): 43 - 57. Santa Fe de Bogotá.