

**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y FÍSICA DE LOS AGREGADOS
DE LA CANTERA RODEB Y ACOPIOS, APLICADA A
CONCRETOS Y FILTROS.**

**ANGIE CRISTINA CULMA PIRABAN
FAINDRY JULIETH ROJAS FARFÁN**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C**

2018

**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y FÍSICA DE LOS AGREGADOS
DE LA CANTERA RODEB Y ACOPIOS, APLICADA A CONCRETOS Y
FILTROS.**

**ANGIE CRISTINA CULMA PIRABAN
FAINDRY JULIETH ROJAS FARFÁN**

Proyecto de grado

Director:

**Geólogo (Ph.D) Javier Eduardo Becerra Becerra
Docente Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Santo Tomás**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C**

2018

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este trabajo de grado, nuestras vidas se inundan de alegría y satisfacción, por haber superado diversos obstáculos durante el desarrollo del mismo, que nos aproximaba a la meta de realizar un aporte investigativo. Sin embargo, esta labor hubiese sido inalcanzable sin la ayuda de Dios y de aquellas personas que nos brindaron apoyo para culminar este objetivo; es por ello, que queremos expresarles nuestros más profundos agradecimientos.

En primer lugar, queremos agradecer a Dios por habernos dado la fortaleza, la esperanza, dedicación, paciencia y en especial la salud para poder realizar este trabajo; a nuestros padres y familiares que, con su amor incondicional, su apoyo y su gran ejemplo hicieron posible esta meta, dándonos palabras de aliento en días de dificultad y agotamiento, todo para nuestra tranquilidad y bienestar.

Asimismo, agradecemos de manera muy especial, a nuestro director de grado Javier Eduardo Becerra Becerra, que, con su entrega, apoyo y gran experiencia, permitió un trabajo de investigación significativo; e hizo aportes a nuestra vida personal y profesional.

Finalmente, le agradecemos a los docentes que nos ofrecieron su conocimiento y a todas aquellas personas que siempre nos ayudaron y animaron para alcanzar este logro.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	16
INTRODUCCIÓN.....	17
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.1. DESCRIPCIÓN.....	18
1.2. FORMULACIÓN.....	18
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	19
1.4. OBJETIVOS.....	20
1.4.1. General.....	20
1.4.2. Específicos.....	20
1.5. ANTECEDENTES.....	21
1.5.1. Antecedentes Nacionales.....	21
1.5.2. Antecedentes Internacionales.....	22
2. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	23
2.1. LOCALIZACIÓN.....	23
2.2. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS TOMADAS.....	25
2.2.1. Arena de peña.....	25
2.2.2. Arena de río.....	26
2.2.3. Triturado de 1/2" y 3/4".....	26
3. MARCO CONCEPTUAL.....	27
3.1. ARENAS.....	27
3.1.1. Definición.....	27
3.1.2. Características de las arenas.....	28
3.1.3. Procesos de exploración y explotación de las arenas.....	29
3.1.4. Uso de las arenas como material de construcción.....	29
3.2. GRAVAS.....	30
3.2.1. Definición.....	30
3.2.2. Características de las gravas.....	31
3.2.3. Usos de las gravas como material de construcción.....	31

4.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	31
4.1.	METODOLOGÍA.....	31
4.1.1.	FASE 1.....	32
4.1.2.	FASE 2.....	32
4.1.3.	FASE 3.....	32
4.1.4.	FASE 4.....	33
4.1.5.	FASE 5.....	33
4.1.6.	FASE 6.....	33
4.2.	FLUJOGRAMA.....	33
5.	ENSAYOS PARA LA IDENTIFICACIÓN MINERALÓGICA DE LOS AGREGADOS.....	36
5.1.	PETROGRAFÍA.....	36
5.1.1.	Componentes petrográficos.....	37
5.1.2.	Procedimiento del análisis petrográfico.....	39
5.1.3.	Preparación de las muestras para un análisis petrográfico.....	40
5.1.4.	Tipo de observaciones al microscopio petrográfico.....	41
5.1.5.	Identificación de minerales al microscopio petrográfico.....	44
5.2.	DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	46
5.2.1.	Preparación de la muestra.....	47
5.2.2.	Procedimiento para la difracción de rayos x.....	47
5.2.3.	Difractograma.....	48
5.2.4.	Aplicaciones.....	48
6.	EL CONCRETO Y SUS CARACTERÍSTICAS.....	49
6.1.	CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO RECIÉN MEZCLADO.....	51
6.1.1.	Mezclado.....	51
6.1.2.	Manejabilidad.....	51
6.1.3.	Consolidación.....	52
6.1.4.	Hidratación.....	52
6.2.	CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO ENDURECIDO.....	52
6.2.1.	Curado.....	53

6.2.2.	Resistencia.....	53
6.2.3.	Durabilidad	54
6.2.4.	Permeabilidad	57
6.2.5.	Peso unitario (densidad)	57
7.	AGREGADOS PARA EL CONCRETO.....	57
7.1.	CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS	58
7.1.1.	Según su procedencia.....	58
7.1.2.	Según su tamaño.	61
7.1.3.	Según su gravedad específica.	62
7.2.	CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS	62
7.2.1.	Propiedades químicas.....	63
7.2.2.	Propiedades físicas	67
7.2.3.	Propiedades mecánicas	73
7.2.4.	Presencia de contaminantes y sustancias perjudiciales.....	74
8.	AGREGADOS PARA FILTROS EN PLANTAS DE PURIFICACIÓN DE AGUA. 77	
8.1.	FILTRACIÓN DEL AGUA	77
8.2.	FILTRACIÓN RÁPIDA	78
8.2.1.	Medio filtrante.....	79
8.3.	FILTRACIÓN LENTA.....	85
8.3.1.	Medio filtrante.....	86
8.4.	LAVADO DE MEDIOS FILTRANTES	87
9.	NORMATIVA Y ESPECIFICACIONES EMPLEADAS.....	88
9.1.	Normativa para concretos.....	88
9.2.	Normativa para filtros.....	89
10.	RESULTADOS.....	91
10.1.	ENSAYOS MINERALÓGICOS	91
10.1.1.	Reconocimiento macroscópico	91
10.1.2.	Petrografía	106
10.1.3.	Difracción de rayos x.....	121

10.2.	ENSAYOS FÍSICOS.....	121
10.2.1.	Ensayos físicos para concreto de los agregados finos.....	121
10.2.2.	Ensayos físicos para concreto de los agregados gruesos	135
10.2.3.	Ensayos físicos para filtros.....	153
11.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COMPARACIÓN CON ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	156
11.1.	COMPORTAMIENTO DE LOS AGREGADOS EN EL CONCRETO ...	156
11.2.	COMPORTAMIENTO DE LOS AGREGADOS EN FILTROS.....	162
	CONCLUSIONES	165
	BIBLIOGRAFÍA.....	168
	ANEXOS.....	173

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Localización geográfica de las muestras de agregado	24
Tabla 2. Límites del tamaño de grano y nomenclatura de gravas y arenas.....	28
Tabla 3. Factores que influyen en la resistencia a la compresión del concreto.	54
Tabla 4. Clasificación de las rocas ígneas según su velocidad de consolidación y localización (origen).....	59
Tabla 5. Clasificación de las rocas sedimentarias, origen mecánico.	59
Tabla 6. Clasificación de las rocas sedimentarias, origen químico y orgánico.	60
Tabla 7. Rocas metamórficas	60
Tabla 8. Clasificación de los agregados según el tamaño de sus partículas.....	61
Tabla 9. Clasificación de los agregados según su densidad.....	62
Tabla 10. Minerales reactivos con los álcalis del cemento.	64
Tabla 11. Rocas potencialmente reactivas con los álcalis del cemento.	65
Tabla 12. Límites para el análisis granulométrico del agregado fino.	68
Tabla 13. Requisitos de gradación para agregado grueso.	68
Tabla 14. Límites de contenido de partículas livianas en agregado para concreto.	75
Tabla 15. Clasificación de los filtros.....	77
Tabla 16. Medios filtrantes en filtros rápidos.....	79
Tabla 17. Características de la arena para filtros rápidos.....	82
Tabla 18. Especificaciones de lechos de arena.....	83
Tabla 19. Gravedad específica y solubilidad en ácido para los medios filtrantes	83
Tabla 20. Especificaciones de la grava soporte	87
Tabla 21. Lista de ensayos de los agregados para concreto realizados en el marco de la investigación.	89
Tabla 22. Lista de ensayos de los agregados para filtros realizados en el marco de la investigación.	90
Tabla 23. Composición mineralógica y forma de los granos del triturado de 1/2".....	97
Tabla 24. Composición mineralógica y forma de los granos del triturado de 3/4"	102
Tabla 25. Composición mineralógica de la arena de río y características de los minerales encontrados.	109
Tabla 26. Composición mineralógica de la arena de peña y características de los minerales encontrados.	112
Tabla 27. Composición mineralógica del triturado de 1/2" y características de los minerales encontrados.	115
Tabla 28. Composición mineralógica del triturado de 3/4" y características del mineral encontrado.	119
Tabla 29. Resultados de ensayo de difracción de rayos x de los agregados.....	121
Tabla 30. Masa seca inicial y masa seca lavada por el tamiz No. 200 para arena de río y arena de peña.....	123

Tabla 31. Masa retenida en el ensayo de granulometría para arena de río y arena de peña.	123
Tabla 32. Resultados ensayo de granulometría arena de río.	124
Tabla 33. Resultados ensayo de granulometría arena de peña.	125
Tabla 34. Datos: Ensayos de densidad y absorción de agregado fino para concreto.	127
Tabla 35. Resultados: Ensayos de densidad y absorción de agregado fino para concreto.	128
Tabla 36. Datos: Ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznales del agregado fino.	129
Tabla 37. Resultados: Ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznales en agregados finos.	130
Tabla 38. Fracciones y masas empleadas en el ensayo de sanidad de los agregados finos.	131
Tabla 39. Masa final obtenida en el ensayo de sanidad para el agregado fino.....	134
Tabla 40. Pérdida porcentual del ensayo de sanidad en agregados finos.....	135
Tabla 41. Masa seca inicial y masa seca lavada por el tamiz No. 200 para gravilla de ½" y gravilla de ¾".	136
Tabla 42. Masa retenida en el ensayo de granulometría para gravilla de ½" y gravilla de ¾".....	137
Tabla 43. Resultados ensayo de granulometría gravilla de 1/2".....	137
Tabla 44. Resultados ensayo de granulometría gravilla de ¾".	138
Tabla 45. Datos: Ensayos de densidad y absorción del agregado grueso para concreto.	140
Tabla 46. Resultados: Ensayos de densidad y absorción del agregado grueso para concreto.	141
Tabla 47. Datos: Ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznales del agregado grueso.	143
Tabla 48. Resultados: Ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznales del agregado grueso.	143
Tabla 49. Fracciones de cada tipo de agregado. Ensayo de partículas planas y alargadas.	144
Tabla 50. Datos de masa seca inicial de cada fracción (Para triturado de ½" y ¾").....	145
Tabla 51. Resultado de masas y porcentaje de partículas aplanadas ((Para triturado de ½" y ¾")	145
Tabla 52. Resultado de masas y porcentaje de partículas alargadas ((Para triturado de ½" y ¾")	146
Tabla 53. Fracciones y masas empleadas en el ensayo de sanidad de los agregados gruesos.	146
Tabla 54. Masa final obtenida en el ensayo de sanidad para el agregado fino.....	148
Tabla 55. Pérdida porcentual del ensayo de sanidad en agregados finos.....	148
Tabla 56. Inspección cualitativa del triturado de ½" NTC 126.....	149

Tabla 57. Inspección cualitativa del triturado de $\frac{3}{4}$ " NTC 126.....	149
Tabla 58. Parámetros iniciales para el ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles del triturado de $\frac{1}{2}$ " y de $\frac{3}{4}$ ".....	152
Tabla 59. Masa seca lavada por el tamiz No.12 de los agregados grueso.....	152
Tabla 60. Porcentaje de desgaste del triturado de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ".....	152
Tabla 61. Parámetros Te y Cu de los agregados finos para filtros.....	153
Tabla 62. Masa inicial seca para el ensayo de porosidad de la arena de río y la arena de peña.	154
Tabla 63. Resultados del ensayo de porosidad para agregados finos.	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica Cundinamarca Colombia – Sopo	24
Figura 2. Canteras Rodeb y Acopios	25
Figura 3. Agregado: Arena de peña	26
Figura 4. Agregado: Arena de río	26
Figura 5. Agregados: Triturado ½” y Triturado ¾”	27
Figura 6. Primer plano de agregado fino, arena.....	27
Figura 7. Agregado grueso (A) grava redondeada y (B) piedra triturada	30
Figura 8. Flujograma del proyecto.....	33
Figura 9. A Esquema microscopio petrográfico B Trayectoria de la luz	37
Figura 10. Componentes petrográficos de las rocas	38
Figura 11. Sección delgada en petrografía	40
Figura 12. Esquema de la elaboración de una lámina de sección delgada de roca a partir de una muestra de mano	41
Figura 13. Documento: “Carta de colores de interferencia de Michel – Levy”	43
Figura 14. Características al microscopio de los minerales	44
Figura 15. Identificación de algunos minerales al microscopio petrográfico. (A) . Feldespato potásico (B) . Cuarzo (C) . Moscovita (D) . Plagioclasa (E) . Anfíbol (F) . Carbonato de calcio (G) . Biotita (H) . Piroxeno.....	45
Figura 16. Difracción de rayos x.	47
Figura 17. Proceso de preparación de la muestra.....	47
Figura 18. Difractograma típico	48
Figura 19. Componentes del concreto: cemento, agua, agregado fino, agregado grueso.	50
Figura 20. Variación de las proporciones usadas en concreto, en volumen absoluto.	50
Figura 21. Efecto del tiempo de curado del concreto en la resistencia del concreto a la compresión.....	53
Figura 22. Factores que influyen en la durabilidad del concreto.	56
Figura 23. Muestra de roca ígnea.....	58
Figura 24. Vista de una sección pulida de un agregado reactivo con álcalis en el concreto. Obsérvese la reacción álcali-sílice que contorna el agregado reactivo y la formación de fisuras.....	64
Figura 25. Varios tamaños de partículas que se encuentran en los agregados para uso en concreto.....	67
Figura 26. Tabla comparativa para la caracterización del grano de redondez y esfericidad que presenta un grano de arena	69
Figura 27. Condiciones de humedad de los agregados.....	71
Figura 28. Mancha de óxido de hierro provocada por impurezas en el agregado.	76

Figura 29. Filtro rápido convencional	78
Figura 30. Tipos de lechos filtrantes	80
Figura 31 Filtro lento de arena	86
Figura 32. Etapa de fluidización en el lavado con flujo ascendente de un filtro.....	88
Figura 33. Muestras seleccionadas para el ensayo macroscópico.....	92
Figura 34. Muestra de arena de río empleada para el reconocimiento macroscópico	93
Figura 35. Tamaños de granos de la arena de río.....	94
Figura 36. Muestra de arena de peña empleada para el reconocimiento macroscópico. Izquierda: comparación en tamaño de la muestra en cuarteo con una moneda. Derecha: Muestra seleccionada vista en el estereoscopio.....	95
Figura 37. Tamaños de granos de la arena de peña.	96
Figura 38. Muestra de triturado de 1/2" para el reconocimiento macroscópico.....	97
Figura 39. Tamaño de los granos del triturado de 1/2"	100
Figura 40. Muestra de triturado de 3/4" para el reconocimiento macroscópico.	101
Figura 41. Tamaños de granos del triturado de 3/4"	105
Figura 42. Sección delgada de la arena de río.....	106
Figura 43. Sección delgada de arena de río. A: Agregados de origen ígneo. B: Agregados de roca arenisca de origen sedimentario. C: Agregado de esquisto de origen metamórfico. (Amph) Anfíboles, (qtz) Cuarzo, (qtzm) cuarzo microcristalino y (E) Esquisto.	107
Figura 44. Minerales de la sección delgada de arena de río. (Qtz) Cuarzo, (Ms) Moscovita, (Pl) Plagioclasa, (Amph) Anfíbol, (Bt) Biotita, (Kfs) Feldespato potásico y (Zrn) Circón. A) Minerales de cuarzo, algunos fracturados y con extinción ondulante, B) Moscovita en medio de cristales de cuarzo, C) Plagioclasa con fracturas intergranulares, D) Cristales de anfíbol, biotita, piroxeno y cuarzo, E) Cristal de feldespato fracturado y F) Cristales de circón y cuarzo.	110
Figura 45. Sección delgada del triturado de la arena de peña.	111
Figura 46. Minerales de la sección delgada de arena de peña. (Qtz) Cuarzo, (Kfs) Feldespato, (1) Óxidos de hierro, (2) Extinción ondulante. A) y B) Granos de cuarzo con óxidos de hierro entre los granos. C) Cuarzo con extinción ondulante. D) Granos de feldespato potásico.	113
Figura 47. Sección delgada del triturado de 1/2"	113
Figura 48. Minerales de la sección delgada del triturado de 1/2". (Qtz) Cuarzo, (Zrn) Circón, (Ms) Moscovita, (Qtzm) Cuarzo microcristalino y (1) Óxidos de hierro. A) cuarzo fracturado. B) Cuarzo C) y D) cuarzo con extinción ondulante. E) Circón entre cristales de cuarzo. F) Moscovita en medio de cristales de cuarzo. G) Cristales de cuarzo, cuarzo microcristalino y moscovita. H) Cristales de feldespato.	117
Figura 49. Sección delgada del triturado de 3/4"	118
Figura 50. Minerales de la sección delgada del triturado de 3/4". (Qtz) Cuarzo, (Ms) Moscovita, (Zrn) Circón, (Ca) Carbonato de calcio, (M) Matriz de grano fino (arcilla o limo). A) Cristales de cuarzo, B) Moscovita orientada en medio de cristales de cuarzo, C) Cristales de moscovita en pequeños tamaños, D) Carbonato de calcio en medio de cristales de	

cuarzo, E) Circón entre cristales de cuarzo. F) Cristales de cuarzo con matriz de grano fino.	120
Figura 51. Procedimiento ensayo de granulometría de los agregados finos. Izquierda: Arena de peña, Derecha: Arena de río. (1) y (2) Ensayo de lavado, (3) y (4) Vertimiento de la muestra de agregado en la serie de tamices, (5) y (6) Agitación de los agregados.	122
Figura 52. Procedimiento ensayo de densidad y absorción de los agregados finos. Derecha: arena de río, Izquierda: arena de peña. (1) y (2) molde cónico para verificar el estado sss, (3) Comprobación de la temperatura del líquido dentro del picnómetro de 23°C y (4) Picnómetro con bomba de vacío para eliminar burbujas de aire.	127
Figura 53. Procedimiento ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznales de la arena de río. (1) Tamizado de las partículas de agregado, (2) Adición de agua destilada a la muestra y (3) Quebramiento de las partículas de arcilla del agregado.	129
Figura 54. Procedimiento realizado para determinar impurezas orgánicas. Derecha: Procedimiento en arena de río. Izquierda: Procedimiento en arena de peña. (1) y (2) botella con 130 ml de muestra (3) y (4) vertimiento de ácido clorhídrico (5) y (6) Botella agitada.	130
Figura 55. Resultados del ensayo de impurezas orgánicas. (1) Arena de peña (2) Arena de río.....	131
Figura 56. Preparación de la solución de sulfato de sodio para el ensayo de solidez de agregados finos. (1) Masa del sulfato de sodio, 350 g/l (2) Mezcla del sulfato de sodio con el agua a 30°C (3) Verificación de la densidad relativa entre 1,151 y 1,174 (4) Mezcla a 21°C durante 48 horas.	132
Figura 57. Procedimiento ensayo de sanidad en agregado fino. Derecha: arena de peña retenido en N° 50, Izquierda: arena de río retenido en N° 50. (1) y (2) Muestras en inmersión, (3) y (4) muestras después de drenar la solución por 15 minutos, (5) y (6) muestras secas al horno hasta masa constante.....	133
Figura 58. Agregado fino después de los cinco ciclos de inmersión y secado. En los platones de la derecha se encuentra el material que pasó el tamiz descrito en la norma y en el platón izquierdo el material retenido en el mismo. 1) Arena de río retiene N° 50. 2) Arena de peña retiene N° 50. 3) Arena de río retiene N° 30. 4) Arena de río retiene N° 16. 5) Arena de río retiene N° 8.....	134
Figura 59. Ensayo para determinar por lavado el material que pasa el tamiz N° 200 y ensayo de granulometría. Izquierda: Triturado de ½", Derecha: Triturado de ¾". (1) y (2) lavado del material de acuerdo a la NTC 78 (3) y (4) Tamizado del material.	136
Figura 60. Procedimiento del ensayo de densidad y absorción de agregados gruesos. (1) y (2) Triturado de ½" y ¾" en estado saturado, (3) y (4) Triturado de ½" y ¾" en estado SSS (Saturado y superficialmente seco).....	140
Figura 61. Procedimiento ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznales del agregado grueso. (A) Triturado de ½", (B) Triturado de ¾", (1) y (2) Adición de agua destilada a las fracciones entre No 4 – 3/8" y entre 3/8" – ¾", (3) y (4) Quebramiento de los terrones de arcilla de las fracciones entre No 4 – 3/8" y entre 3/8" – ¾", (5) y (6) Adición de	

agua destilada a las fracciones entre $3/8'' - 3/4''$ y entre $3/4''$ y $1 1/2''$, (7) y (8) Quebramiento de los terrones de arcilla de las fracciones entre $3/8'' - 3/4''$ y entre $3/4''$ y $1 1/2''$	142
Figura 62. Equipo empleado para ensayo de partículas planas y alargadas (1) Dispositivo de calibración proporcional (2) Calibrador de espesores	144
Figura 63. Procedimiento del ensayo de partículas planas y alargadas del agregado grueso (triturado de $1/2''$ y $3/4''$ (1) Partículas planas (2) Partículas alargadas.....	145
Figura 64. Procedimiento ensayo de sanidad en agregado grueso. Derecha: triturado de $1/2''$ retenido en N° 4, Izquierda: : triturado de $3/4''$ retenido en $1/2''$ (1) y (2) Muestras en inmersión, (3) y (4) muestras después de drenar la solución por 15 minutos, (5) y (6) muestras secas al horno hasta masa constante.....	147
Figura 65. Agregado grueso después de los cinco ciclos de inmersión y secado. En los platones de la derecha se encuentra el material que pasó el tamiz descrito en la norma y en el platón izquierdo el material retenido en el mismo. 1) Triturado de $1/2''$ retiene N° 4. 2) Triturado de $1/2''$ retiene $3/8''$. 3) Triturado de $3/4''$ retiene $1/2''$. 4) Triturado de $3/4''$ retiene $3/4''$	147
Figura 66. Procedimiento ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles de los agregados grueso. (1) Máquina de los Ángeles, (2) y (3) Triturado de $1/2''$ y de $3/4''$ luego de agitación mecánica dentro de la máquina de los ángeles, (4) y (5) Triturado de $1/2''$ y de $3/4''$ luego de agitación, fuera de la máquina de los ángeles y (6) y (7) Tamizado del triturado de $1/2''$ y $3/4''$ por el tamiz No. 12.	151
Figura 67. Curvas granulométricas de los agregados finos para filtros	154
Figura 68. Ensayo de porosidad en el agregado fino. 1) y 2) Arena de río, montaje y expansión respectivamente 3) y 4) Arena de peña, montaje y expansión respectivamente.	155

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Tabla de límites para sustancias dañinas en el agregado fino para concreto	173
Anexo 2. Tabla de límites para sustancias dañinas y requisitos de las propiedades físicas del agregado grueso para concreto.	174
Anexo 3. Tabla de Rocas reactivas según el centro de investigación en pavimentos de California.....	175
Anexo 4. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructuras según la normativa Española del concreto Estructural	175

RESUMEN

Las rocas han sido uno de los materiales más empleados por el hombre para el desarrollo de la sociedad, convirtiéndose en la materia prima principal para la construcción de todo tipo de infraestructura, puesto que brindan resistencia al concreto y constituyen un volumen importante del mismo; e incluso en la elaboración de vidrios, cristales, recubrimiento de fachadas y en la purificación de agua como material filtrante. Sin embargo, los ingenieros dan un uso indistinto a las rocas sin realizar una inspección previa de sus características y su comportamiento en dichas condiciones. Es por esto que en el presente trabajo se caracterizaron agregados de arena de río, arena de peña, triturado de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " de la cantera Rodeb y Acopios en Sopó, Cundinamarca, empleados en la construcción de la zona franca de Tocancipá, en el marco del proyecto de investigación titulado: Caracterización físico-química, mecánica y mineralógica de areniscas utilizadas para construcción de la Zona Franca de Tocancipá, en la cantera Rodeb y Acopios- Sector Hato Grande, Sopó, mediante ensayos físicos y químicos para comprobar sus aptitudes en el concreto y como material filtrante.

Los ensayos físicos realizados fueron granulometría, densidad, absorción, terrones de arcilla, impurezas orgánicas, sanidad, partículas planas y alargadas, desgaste y porosidad. Por su parte, los resultados de composición mineralógica se consolidaron a partir de reconocimiento macroscópico, petrografía y difracción de rayos x. Finalmente se comprobó que el triturado de $\frac{3}{4}$ " es idóneo para ser empleado en concreto, seguido del triturado de $\frac{1}{2}$ " y la arena de río, estos dos con posibilidad de reacción álcali-sílice lenta, afirmación que debe ser comprobada con análisis más detallados; y la arena de peña que es poco apropiada para este uso, debido a los resultados poco favorables de los ensayos de granulometría y sanidad como la mala gradación de sus partículas y su baja resistencia ante la presencia de sulfatos. Los agregados finos no son aptos como material filtrante y no se recomienda el uso de los triturados como soporte para filtros.

INTRODUCCIÓN

Los agregados o áridos son aquellos materiales naturales o artificiales, inertes o de forma granular que se han clasificado principalmente desde el punto de vista de su densidad, tamaño, procedencia, forma y textura (Rivera G. , 2013). Estos agregados son considerados un factor fundamental en la economía, estabilidad y durabilidad en las obras civiles, por lo cual es esencial el estudio de sus propiedades tanto físico-mecánicas como mineralógicas y químicas con el fin de obtener una aplicación eficiente (Gutiérrez de Lopez, 2003). De acuerdo a su procedencia, los agregados ya sean naturales, triturados o sintéticos pueden emplearse en diversas obras de ingeniería civil tales como en la elaboración de concretos asfálticos, de morteros y de concretos hidráulicos así como en la construcción de pavimentos y filtros en plantas de tratamiento de agua (CEPIS & OPS, 2005).

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar las características mineralógicas y físicas de los agregados (arenas y gravillas) tomadas de las canteras Rodeb y Acopios para identificar su posible uso como materiales de construcción y en procesos de purificación del agua. Para su caracterización, se realizan ensayos mineralógicos tales como reconocimiento macroscópico, petrografía y difracción de rayos x con el fin determinar la composición mineralógica, textura y estructura de los agregados. Se realizan también ensayos físicos tales como la determinación de densidad, absorción, análisis por tamizado, determinación de impurezas orgánicas y de terrones de arcilla, desgaste, solidez y porosidad de los agregados, con el propósito de establecer las propiedades físico-químicas de los mismos y la viabilidad de su uso en ingeniería civil.

Este trabajo se enmarca en el proyecto de investigación titulado: Caracterización físico-química, mecánica y mineralógica de areniscas utilizadas para construcción de la Zona Franca de Tocancipá, en la cantera Rodeb y Acopios- Sector Hato Grande, Sopó; realizado por el grupo GIFIC de la Facultad de Ingeniería Civil – Bogotá y cuyo investigador principal es el Geólogo (Ph.D) Javier Eduardo Becerra Becerra; con el apoyo de la Universidad Federal de Minas Gerais de Brasil, se desea realizar un estudio que le genere aportes investigativos al proyecto.

Con motivo de realizar un aporte relevante y significativo a la Universidad Santo Tomás y a todos los profesionales y especialistas interesados en materiales de construcción, se identificará la importancia de estudiar y determinar las propiedades que poseen los agregados independientemente de su zona de producción o extracción, que para el caso del concreto, estos materiales constituyen del 60% al

80% del volumen del mismo y por lo tanto su influencia en las propiedades del concreto presentan efectos significativos no solamente en la calidad de las estructuras sino, también en su consistencia en estado plástico así como la resistencia y durabilidad en estado endurecido. (Ferreira Cuellar & Torres López, 2014)

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

1.1. DESCRIPCIÓN

El problema principal que dinamiza el presente estudio es la práctica extendida de emplear los agregados pétreos, sin conocer sus características y las condiciones a las que estará expuesto el material; y para esto en el presente trabajo de investigación se realizan los ensayos mineralógicos y físicos que permitan identificar las características y propiedades de los agregados objeto de esta investigación correspondiente a arena de río, arena de peña, triturado de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ", tomados de las canteras Rodeb y Acopios, ubicadas en Sopó Cundinamarca. Con los resultados obtenidos se busca identificar si estos materiales cumplen con los requerimientos necesarios para ser empleados en la elaboración de concreto y como material filtrante en plantas de purificación de agua.

1.2. FORMULACIÓN

A lo largo del tiempo, el hombre ha transformado su entorno con el objetivo de adaptarlo a sus necesidades. Para ello ha hecho uso de varios materiales naturales que se han modificado con el paso del tiempo y con el desarrollo tecnológico. En la actualidad, los agregados son utilizados continuamente en el campo de la construcción, estos se encuentran compuestos por arenas, gravas y partículas más finas derivadas de la trituración de las rocas, que son un componente determinante en la calidad, economía, durabilidad y resistencia de las obras civiles como estructuras, balastos, ensanchados de vías, recubrimientos de fachadas y como materia prima en la elaboración de vidrios y cristales. Sin embargo, existe la práctica extendida en canteras y demás sitios de acopio, de emplear estos agregados en la elaboración y fabricación de diversos materiales de construcción, sin tener conocimiento de las características que permitan establecer la forma adecuada de

emplearlos, de acuerdo a las condiciones a las que estará expuesto el material y a la finalidad de su uso. En el caso de la cantera Rodeb y Acopios, localizada en el municipio de Sopó, no se tiene una investigación precisa de las propiedades de los materiales extraídos del lugar, lo que puede generar problemas en la durabilidad y resistencia de fachadas, concreto, vías y vidrios.

Reconociendo la necesidad de emplear las rocas como materiales de construcción en las zonas aledañas a la cantera y la poca información que se tiene acerca del agregado, el presente trabajo de grado tiene por finalidad caracterizar las arenas y triturados tomados de la cantera Rodeb y Acopios, mediante ensayos mineralógicos y físicos con el fin de determinar si cumplen con los requisitos y propiedades necesarias para ser empleadas en la elaboración de concreto y como material filtrante en plantas de purificación de agua.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Colombia cuenta con una cantidad significativa de rocas que pueden ser empleadas como agregados para diversos usos en el campo de la ingeniería civil tales como materia prima para la elaboración de concreto, de vidrio, recubrimientos de fachadas, ladrillo, bases de carreteras y en procesos de purificación de aguas, entre otros. Sin embargo, en muchos casos no se realiza un estudio detallado acerca de las características que deben tener los materiales para garantizar la calidad, resistencia y durabilidad que requieren las obras civiles, asunto que lleva a plantear la necesidad de adelantar un proyecto de investigación que permita caracterizar los agregados ubicados en la cantera Rodeb y Acopios para verificar si poseen las propiedades óptimas para emplearlos en diferentes construcciones. Este trabajo es de gran importancia ya que por medio del análisis de los ensayos mineralógicos y físicos es posible identificar si las arenas y triturados, objeto de esta investigación poseen características que cumplan con los requerimientos necesarios para ser utilizados en la elaboración de concreto y como material filtrante en plantas de purificación de agua.

De esta manera los resultados del trabajo permiten mostrar la importancia de implementar el aprovechamiento de los agregados de la cantera Rodeb y Acopios para ser utilizados en zonas aledañas que se encuentran en construcción y para incentivar la posibilidad de nuevos estudios en lugares con características similares.

Aplicando la concepción humanista-integral, característica de la formación impartida en la Universidad Santo Tomás, se busca que el proyecto reconozca e incorpore

componentes de orden social, como el mejoramiento de las condiciones de calidad de vida de las personas vinculadas de manera directa e indirecta a la explotación de la cantera. De esta manera y junto con el estudio detallado de este tipo de rocas se busca brindarle a la comunidad presente en las zonas aledañas a la cantera, mayor conocimiento acerca de las características que se requieren para obtener productos con los mejores estándares de calidad.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. General

Estudiar las características mineralógicas y físicas de las arenas y triturados tomados de la cantera Rodeb y Acopios para identificar su posible uso como materiales de construcción y procesos de purificación del agua.

1.4.2. Específicos

- Identificar las características que deben tener los agregados como arena de peña, arena de río, triturado de $\frac{1}{2}$ " y triturado de $\frac{3}{4}$ " para ser empleadas en la elaboración de concreto y como material filtrante en plantas de purificación de agua.
- Analizar los resultados de ensayos mineralógicos tales como petrografía y difracción de rayos x, para determinar los minerales y el grado de reactividad de los agregados, que serán empleados en el concreto.
- Analizar los ensayos físicos bajo la normativa colombiana para concreto y filtros.
- Comparar los resultados obtenidos a partir de los ensayos con los requerimientos necesarios para la fabricación de concreto y material filtrante para purificación del agua.
- Profundizar acerca de técnicas de análisis y ensayos físico – mecánicos para agregados pétreos, con el fin de adquirir competencias adicionales a la formación impartida durante la carrera.
- Establecer la importancia para los ingenieros civiles de la realización de ensayos físicos y mineralógicos que permitan conocer las propiedades de los agregados y establecer su comportamiento en el concreto en su estado fresco y endurecido.

1.5. ANTECEDENTES

1.5.1. Antecedentes Nacionales.

En Colombia se han realizado trabajos de investigación que buscan establecer las propiedades de las rocas areniscas como materiales de construcción y la caracterización de agregados pétreos para diferentes usos. Es así como el trabajo de maestría titulado “Análisis estratigráfico, petrográfico y geoquímico de los episodios fosfáticos de la parte inferior y media del grupo Guadalupe en el sector central de la cordillera oriental, Colombia”. Su autora Hellen María Guarín Insignares, de la Universidad Nacional de Colombia, expone los resultados del análisis petrográfico y químico realizado en las muestras extraídas del Grupo Guadalupe en el sector centro-oriental del Departamento de Boyacá. En el trabajo de María Guarín, se divide el Grupo Guadalupe en tres formaciones para su estudio: Formación Arenisca Dura, Formación los Pinos y Formación Labor-Tierna. De acuerdo con los resultados petrográficos, se obtuvo que la formación de arenisca dura se encuentra constituida principalmente por arenitas de cuarzo de grano fino, matriz lodosa (25%-40%) y cemento calcáreo grueso (25%). También se encontraron limolitas de cuarzo (29%-39%) y arcillolitas fosilíferas. En la formación Los Pinos, los resultados indican que existe en esta, rocas calcáreas tales como biosparitas de bivalvos (15%-20%) y en menor proporción biomicritas de foraminíferos. También se encontró arenita de cuarzo de grano muy fino. Finalmente, en la formación Labor- Tierna se encontró principalmente arenitas de cuarzo de grano muy fino, lodosas con pellets fecales fosfáticos (15%-15%) y glauconita (2%-5%). Además de arenita de cuarzo de grano medio y grueso, limosas y glauconíticas (10%-12%). (Guarín Insignares, 2011)

En el año 2014, Daniel Ferreira y Karen Torres, de la Universidad Católica de Colombia realizaron su trabajo de grado, el cual se encuentra enfocado a la caracterización física de agregados pétreos para concretos en el caso de la cantera Dromos (Mosquera) y la mina Cemex (Apulo). A partir de la petrografía de los agregados en comparación, se determina cuál de ellos presenta mejores propiedades mineralógicas. De igual forma se realizan diferentes ensayos como la resistencia del agregado grueso al desgaste, análisis granulométrico, límite plástico e índice de plasticidad de suelos, a partir de los cuales se caracterizan los materiales para determinar la influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. Los resultados obtenidos indican que los agregados de Vista Hermosa son demasiado permeables para ser empleados en mezclas de concreto, además de evidenciarse la presencia de cuarzo en ambos tipos de agregados, factor que

puede ser perjudicial en el concreto, ya que podría reaccionar con los álcali-sílice y a su vez disminuir la vida útil de la estructura en la que se emplee. También se encontraron altos contenidos de arcilla en los agregados de Vista Hermosa, lo que podría afectar la mezcla, característica completamente diferente a las identificadas en los agregados de la Mina Cemex, que cuenta con bajo contenido de finos. A partir de los análisis realizados se concluye con los agregados de la Mina Cemex son los más adecuados para realizar concreto (Ferreira & Torres, 2014).

Por otra parte, en filtros para plantas de tratamiento, Philippe Noirjean se basa en la caracterización de las arenas de peña y de río procedentes de canteras o minas de montaña para el uso de filtración lenta, analizaron 6 muestras de arena de peña del departamento de Boyacá y una muestra de arena de río Cauca de las cuales se obtuvieron resultados que demuestran la importancia de realizar análisis físico – químicos y morfológicos con el fin de tener una idea de las propiedades fundamentales que debe tener la arena antes de su empleo en filtro (Noirjean, 1996).

1.5.2. Antecedentes Internacionales

A nivel internacional, específicamente en México, se realizó el proyecto de grado titulado “Caracterización de los agregados de bancos para agregados de concreto y morteros, ubicados en los municipios de Tactic y San Cristóbal Verapaz, en el departamento de alta Verapaz”, en el cual se tomaron dos muestras de agregado fino y grueso del banco Tactic, y una muestra del banco San Cristobal. Se analizaron los atributos de estos agregados siguiendo lo establecido por la Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales, ensayos a partir de los cuales se determinó que los agregados de los dos bancos son aptos para ser empleados en la elaboración de cemento Portland puesto que no son reactivos, están exentos de materia orgánica y presentan una resistencia mecánica adecuada. Uno de los aspectos poco favorables fue la granulometría, sin embargo, se considera que se puede tener control sobre este aspecto. Para corroborar la aptitud de los agregados para ser empleados en concreto, se elaboraron probetas, que al ser ensayadas a compresión y tensión arrojaron resultados favorables (Pinto Alonzo, 2004).

Otros estudios internacionales relacionados con los filtros para plantas de tratamiento, como se menciona en la investigación realizada por Rolland L, Molle P y otros, llamada “Influence of the physical and mechanical characteristics of sands on the hydraulic and biological behaviours of sand filters”, donde establecen que uno

de los parámetros de diseño más importantes en relación con la eficiencia del tratamiento y sustentabilidad de los fenómenos de obstrucción en filtros de arena son las características de la misma y su implementación. Para ello se estudiaron dos arenas de 0.42 y 0.8 mm, implementando dos estados (compactación natural y 100% de compactación Proctor) en un filtro durante 8 meses alimentados con aguas residuales sintéticas. Los resultados obtenidos proporcionaron información acerca de la importancia de los medios de arena en el tratamiento y las transferencias de gas y agua en un filtro de arena. Además, se identificó que parámetros físicos como la distribución del tamaño de las partículas no son los únicos que permiten determinar los comportamientos biológicos e hidráulicos de un filtro de arena; también la compactación juega un papel importante ya que esta puede llegar a ser perjudicial en el caso de la arena fina y beneficioso en el caso de las arenas gruesas (Rollan et al., 2008)

2. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

Los agregados objeto de esta investigación corresponden a materiales de depósito procedentes de diversas fuentes de extracción, tomados de las canteras Rodeb y Acopios, localizadas en zonas aledañas al municipio de Sopo, Cundinamarca. A continuación, se describirá detalladamente la ubicación geográfica de dichas canteras:

2.1. LOCALIZACIÓN

Sopo se encuentra localizado en el departamento de Cundinamarca Colombia. El municipio se ubica entre los 4°54'50" de latitud norte y a los 73°57'06" de longitud oeste. Posee una extensión total de 111.5 km² y cuenta con una población total aproximada de 26.769 habitantes. Limita al oriente con el municipio de Guasca, al occidente con los municipios de Cajicá y Chía, al norte con el municipio de Tocancipá y al sur con la Calera.

Fuera del área urbana se encuentra localizada una cantera y una zona de acopio de las cuales se seleccionaron los cuatro tipos de agregado: arena de peña, extraída de formaciones areníticas y procesadas en la cantera Rodeb; y la arena de río, triturado de ½" y triturado de ¾", tomados del Acopio. La localización geográfica de estos agregados se registra con la ayuda del GPS en la zona de muestreo (Tabla 1).

Tabla 1. Localización geográfica de las muestras de agregado

TIPO DE AGREGADO	ALTITUD	COORDENADAS GEOGRAFICAS	
		LATITUD	LONGITUD
Arena de peña	2581 m	4° 55' 31.76" N	73° 59' 44.32" O
Arena de río	2585 m	4° 55' 25.17" N	73° 59' 46.18" O
Gravilla ½"	2590 m	4° 55' 24.60" N	73° 59' 45.70" O
Gravilla 3/4"	2578 m	4° 55' 24.51" N	73° 59' 46.20" O

Fuente. Autores, tomadas con GPS

En las figuras 1 y 2, se muestran las imágenes de georreferenciación del terreno donde se realizó la respectiva toma de muestras:

Figura 1. Localización geográfica Cundinamarca Colombia – Sopo



Fuente. Imágenes tomadas de Google Earth

Figura 2. Canteras Rodeb y Acopios



Fuente. Imagen tomada de Google Earth

2.2. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS TOMADAS

El muestreo de los agregados para la caracterización de sus propiedades mineralógicas, químicas y físicas se realizó en las canteras Rodeb y Acopios como se mencionó anteriormente. Los agregados que se tomaron corresponden a arena de peña, arena de río, triturado de $\frac{1}{2}$ " y triturado de $\frac{3}{4}$ ", los cuales se describirán a continuación respectivamente:

2.2.1. Arena de peña

La arena de peña corresponde a un agregado de un tamaño que varía entre 9.52 mm a 0.075 mm; este agregado es extraído de la cantera Rodeb y posee un color amarillo anaranjado muy claro, con presencia de materia orgánica a simple vista (Figura 3):

Figura 3. Agregado: Arena de peña



Fuente. (Culma & Rojas; 2017)

2.2.2. Arena de río

El agregado correspondiente a la arena de río posee un tamaño que varía entre 4.75 mm a 0.075 mm. Esta arena es tomada de la zona de depósito del acopio y tiene un color grisáceo a la vista (Figura 4).

Figura 4. Agregado: Arena de río



Fuente. (Culma & Rojas; 2017)

2.2.3. Triturado de 1/2" y 3/4"

Los triturados de 1/2" y 3/4" corresponden a agregados de tamaños que varía entre 19.05 mm a 4.75 mm y entre 25.40 mm a 4.75 mm respectivamente. Estos agregados tomados de la zona de Acopio, presentan colores grises claros y oscuros y poseen en su mayoría formas angulares. Sin embargo, se observó que algunas partículas presentan formas planas, alargadas y redondeadas a la vista (Figura 5).

Figura 5. Agregados: Triturado 1/2" y Triturado 3/4"



Fuente. (Culma & Rojas; 2017)

3. MARCO CONCEPTUAL.

3.1. ARENAS

3.1.1. Definición

Arena es el nombre con que se designa a los materiales de grano fino que provienen del desprendimiento de las partículas finas de rocas causada por agentes erosivos o de trituración artificial. El tamaño de las arenas varía entre 2 mm y 0,05 mm de diámetro. Cuando la arena se encuentra libre de arcilla, tiene algunas características como no contraerse al secarse, no es plástica, mucho menos compresible, y al aplicar una carga sobre su superficie, se comprimen de forma casi instantánea (Villalaz, 2004).

Figura 6. Primer plano de agregado fino, arena.



Fuente: (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

3.1.2. Características de las arenas

Las arenas comerciales se componen principalmente de sílice (SiO₂), fragmentos de rocas silíceas y de pequeñas cantidades de feldspatos, micas, óxidos de hierro y minerales pesados. Los usos de estas arenas requieren especificaciones de tamaño de grano, características físicas y composición química; en diferentes aplicaciones a la industria de la construcción. En la tabla 2 se presentan la nomenclatura de las gravas, arenas y sus respectivos tamaños.

Tabla 2. Límites del tamaño de grano y nomenclatura de gravas y arenas

DIÁMETROS EN MILÍMETROS	FRAGMENTOS	AGREGADOS SIN CONSOLIDAR		AGREGADOS CONSOLIDADOS	
256	Guijón	Gravas	De guijones	Conglomerados	De guijones
64	Guijarro		De guijarros		De guijarros
4	Gránulo		De gránulos		De gránulos
2	Arena muy gruesa	Arenas		Areniscas	
1	Arena gruesa				
0.5	Arena media				
0.25	Arena fina				
0.125	Arena muy fina				
0.0625					

Fuente. Especificaciones de las areniscas y gravas (INGEOMINAS, 1987)

Cuando los fragmentos de minerales y rocas son consolidados las arenas reciben el nombre de areniscas. (INGEOMINAS, 1987). Estas areniscas están constituidas por feldspatos, fragmentos de roca y por más del 95% de contenidos de cuarzo llamadas cuarzo arenitas o compuestas casi de puro cuarzo, se clasifican de acuerdo con el tamaño de sus granos como fina, media o gruesa y de acuerdo a la naturaleza de los materiales cementantes. Estas rocas tienden a ser bastante resistentes, sin embargo, en ocasiones pueden llegar a ser muy friables a causa del material cementante que posean (Suarez, 1998).

3.1.3. Procesos de exploración y explotación de las arenas

Las arenas corresponden a materiales de construcción que se utilizan en un porcentaje mayor al 90%, sin embargo, existen otros usos industriales que emplean materiales con altos contenidos de sílice. Para cada uso es necesario tener en cuenta algunas especificaciones como las presentadas anteriormente. Las arenas industriales pueden ser extraídas de depósitos marinos y continentales, por medio de explotaciones a cielo abierto o dragado de yacimientos bajo agua, estos procesos de extracción incluyen el lavado, tamizado y trituración de las mismas.

En Colombia la explotación de las arenas se realiza con fines industriales, provienen de aluviones recientes y formaciones geológicas del cretáceo y terciario. Los depósitos recientes poseen gran aplicación en la industria de la construcción debido al grado de impurezas que generalmente tienen. En departamentos como Boyacá y Cundinamarca se explotan materiales de las formaciones Tierna, Areniscas de Labor y Arenisca Dura del Grupo Guadalupe, de edad cretácea. Las que son más explotadas se presentan en zonas como los cerros cercanos a Bogotá, los alrededores de la Sabana de Bogotá y los municipios de Boyacá como Sogamoso, Iza y Cuítiva. Así mismo en Departamentos como Huila y Tolima se explotan areniscas y conglomerados del Grupo Gualanday de edad Terciario, especialmente en el Carmen de Apicalá y Cunday (Tolima).

3.1.4. Uso de las arenas como material de construcción

Las arenas industriales son ampliamente usadas en la fabricación de vidrios, en el filtrado de fluidos, en la fabricación de concretos y morteros, en fundiciones ferrosas y no ferrosas, y entre otras aplicaciones como cerámica, fabricación de silicato de sodio, elaboración de arenas y productos refractarios, etc.

En plantas de tratamiento de agua se pueden utilizar arenas para filtros con el objetivo de eliminar las bacterias y los sedimentos presentes en la misma para el consumo humano y la purificación de piscinas. De igual forma se pueden emplear en la filtración de aguas provenientes de pozos, para este uso, las arenas deben estar completamente limpias, con tamaño de grano homogéneo y altamente permeable, compuestas de cuarzo y en ausencia de arcillas y materia orgánica.

En definitiva, como se mencionó anteriormente estas arenas pueden emplearse para la fabricación de concretos y morteros generalmente empleados para construcciones, con el objetivo de soportar grandes esfuerzos y elevados usos en

sitios de numerosas concentraciones de personas o lugares para grandes movimientos de maquinaria pesada. (Romero Buitrago, 2010)

3.2. GRAVAS

3.2.1. Definición

Las gravas pueden clasificarse como naturales o artificiales. Las naturales son aquellas partículas de suelo cuyo tamaño es mayor a 2 mm y menor a 7,62cm (3"); que son producto de las acumulaciones sueltas de fragmentos de roca. Las gravas suelen encontrarse en los lechos y márgenes de ríos, al igual que en depresiones de terrenos en los que se acumula el material por el transporte de ríos, y en muchos otros lugares a los cuales las gravas son retransportadas (Villalaz, 2004).

Las gravas artificiales son materiales que tienen características similares a las naturales. Estas se obtienen de procesos de fabricación, por medio de restos de piedra de machaqueo, presentan formas angulares que al ser mezcladas con cemento y agua se produce concreto (Varas, Álvarez de Buergo, & Fort, 2007).

Figura 7. Agregado grueso (A) grava redondeada y (B) piedra triturada



Fuente: (Monroe, Reed, & Pozo, 2008)

3.2.2. Características de las gravas

Las gravas naturales se caracterizan principalmente por ser fragmentos de roca que han resistido al proceso de erosión, de transporte y sedimentación y que generalmente son redondeados. Existe gran variedad de gravas, según su composición, dentro de algunos ejemplos podemos encontrar (Universidad de Oviedo, 2004):

- Granito
- Esquistos
- Gravas silíceas
- Gravas calizas

3.2.3. Usos de las gravas como material de construcción.

Las gravas más comunes son las silíceas y las calizas. Estas primeras se caracterizan por estar formadas principalmente de cuarzo. Debido a la gran resistencia que presentan, son bastante empleadas como agregados en concreto y mezclas asfálticas.

Por su parte, las gravas calizas tienen una dureza más baja, aunque de igual manera se emplean en concreto y mezclas asfálticas, esto debido a que tienen una buena adhesividad con el cemento y los ligantes de bitumen; sin embargo, no se pueden emplear de forma exclusiva en las mezclas asfálticas, ya que sus características generan una rodadura resbaladiza.

Además de ser empleadas como agregados para concreto, las gravas se emplean en filtros de presas, como material estructural y como rellenos en zanjas drenantes (Universidad de Oviedo, 2004).

4. DISEÑO METODOLÓGICO.

4.1. METODOLOGÍA.

Para alcanzar los objetivos propuestos en el proyecto, se proponen 6 fases o etapas en la metodología descrita a continuación:

4.1.1. FASE 1

- 4.1.1.1 Se desarrolla la consulta de las características y especificaciones que deben tener los agregados, para ser empleados como material filtrante y en la fabricación de concreto.
- 4.1.1.2. Se realiza la revisión del estado del arte y de los antecedentes previa a la iniciación del proyecto y durante la ejecución del mismo permitiendo de esta manera un estudio más profundo acerca de los desarrollos tanto nacionales como internacionales presentes en estudios relacionados con el proyecto.

4.1.2. FASE 2

- 4.1.2.1. Se realiza la visita a la cantera Rodeb, ubicada en el municipio de Sopo, con el fin de efectuar la toma de muestras de los agregados para la ejecución de los ensayos mineralógicos.
- 4.1.2.2. Se efectúan los ensayos mineralógicos de los agregados con el fin de identificar los minerales que contiene la roca en estudio. Dentro de los ensayos mineralógicos propuestos están el reconocimiento macroscópico, la petrografía y la difracción de rayos x; a partir de los cuales se espera clasificar y describir las rocas en cuanto a textura, estructura, detección de minerales susceptibles de genera daños y composición mineralógica.

4.1.3. FASE 3

- 4.1.3.1. Se efectúa una segunda visita a la cantera Rodeb y se realiza la toma de muestras para la realización de los ensayos que requieren los agregados pétreos en el concreto.
- 4.1.3.2. Se realizan los ensayos que requieren los agregados en las mezclas de concreto, tales como la determinación de densidad y absorción del agregado fino, análisis por tamizado de los agregados finos, determinación de impurezas orgánicas del agregado fino para el concreto, determinación de los terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados. Estos ensayos se hicieron teniendo en cuenta las normas NTC (Norma técnica colombiana). También se realizan otros ensayos que son exclusivos para agregados gruesos, como partículas planas y alargadas; y desgaste en la máquina de los Ángeles.

4.1.3.3. Se ejecutan los ensayos físicos necesarios para el material filtrante para la purificación de agua. Los ensayos realizados con este fin son granulometría, peso específico y porosidad.

4.1.4. FASE 4

4.1.4.1. Se analizan los resultados de los ensayos físicos elaborados, con el fin de identificar las características propias de los agregados sujetos de esta investigación.

4.1.5. FASE 5

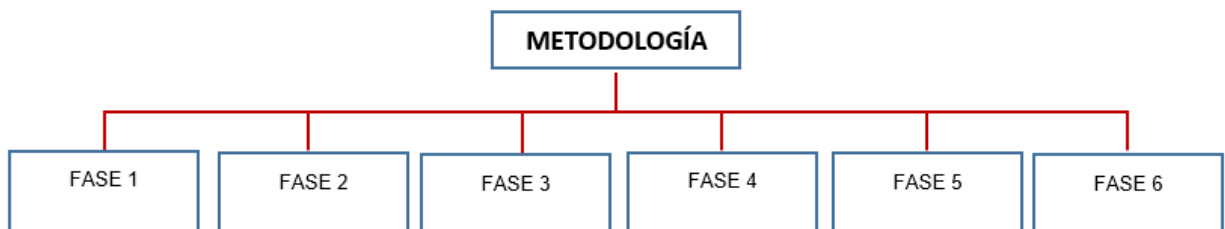
4.1.5.1. Se analizan los ensayos mineralógicos tales como reconocimiento macroscópico, petrografía y difracción de rayos x, que se ejecutaron previamente con el fin de identificar su composición, características y propiedades.

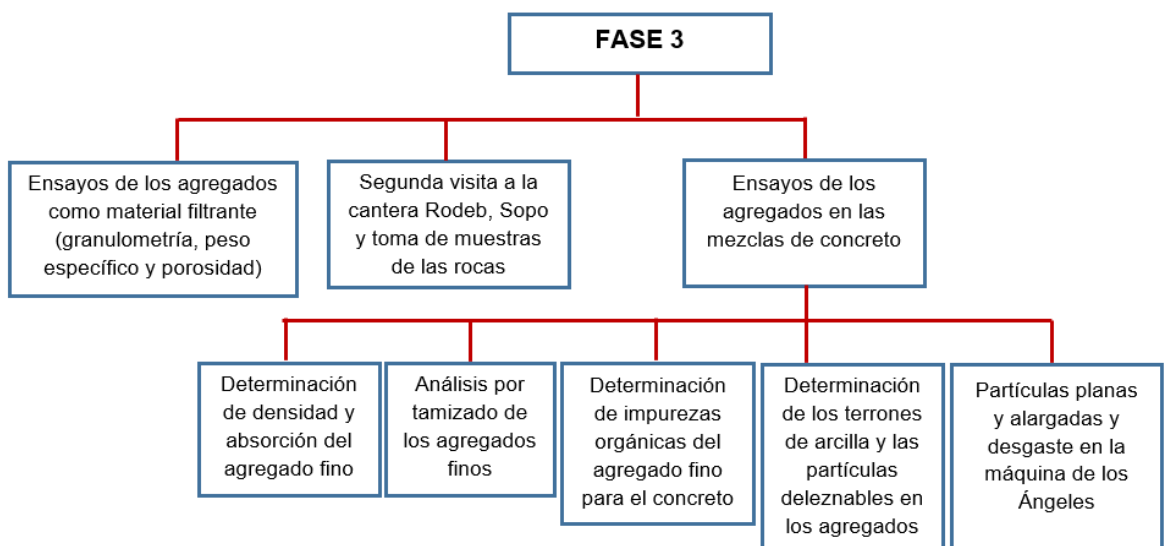
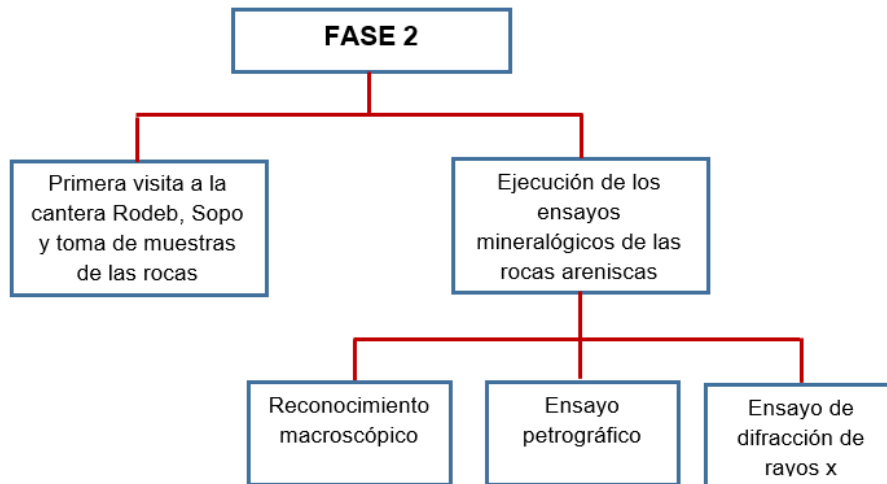
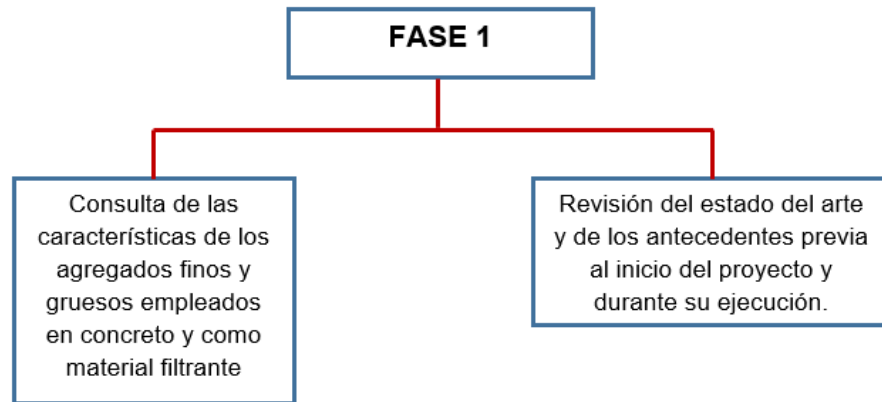
4.1.6. FASE 6

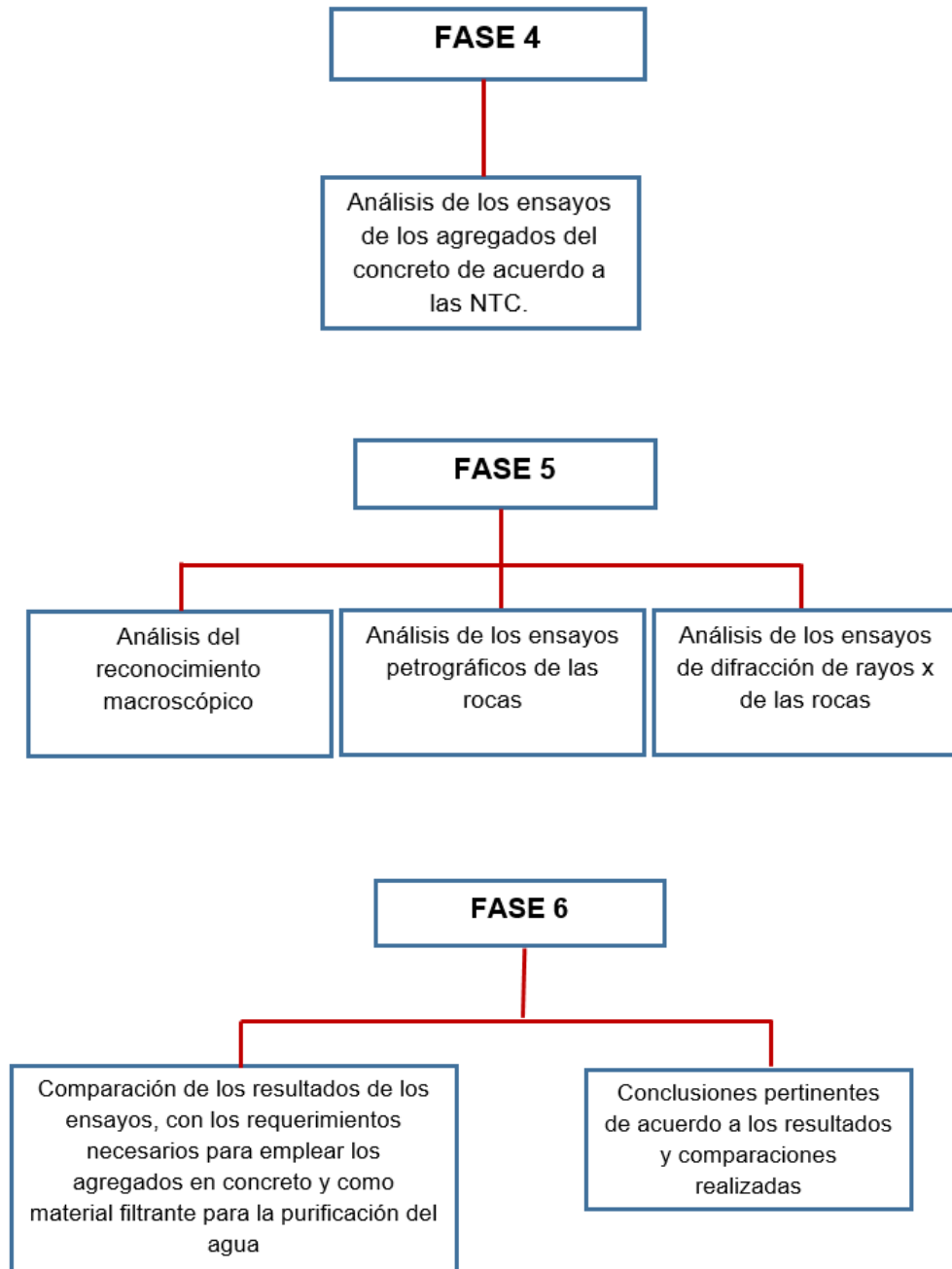
4.1.6.1. Se realiza la comparación de los resultados obtenidos mediante los ensayos, con los requerimientos necesarios para emplear las rocas muestreadas en la elaboración de concreto y como material filtrante para la purificación del agua; y se identifica en qué usos y condiciones presentan mayor rendimiento.

4.2. FLUJOGRAMA

Figura 8. Flujoograma del proyecto.







5. ENSAYOS PARA LA IDENTIFICACIÓN MINERALÓGICA DE LOS AGREGADOS.

5.1. PETROGRAFÍA

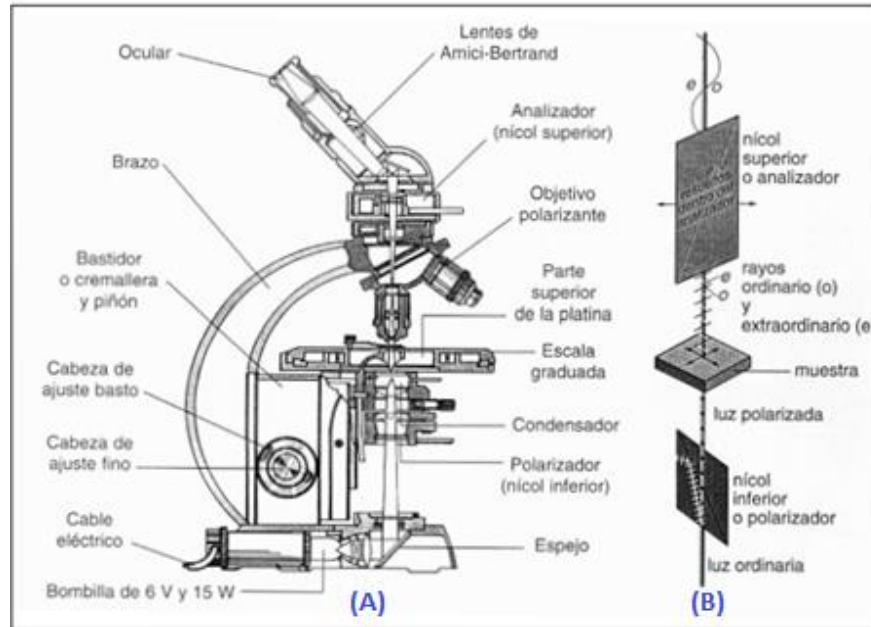
La petrografía se define como un campo de la geología, que complementa la petrología y es la encargada de clasificar y describir las rocas mediante microscopía óptica, permitiendo de esta manera clasificarla de acuerdo a sus características como textura, composición mineralógica y estructura de la roca (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

En la textura se incluyen aspectos como el tamaño y la forma de los granos, así como los espacios vacíos, fisuras y poros de la roca. (R.M., F.J., & J., 2017)

La microscopía óptica es una técnica que permite la identificación de los minerales y la caracterización de las rocas de una forma detallada. (Jimenez & Velilla, 2004). Este reconocimiento se efectúa mediante un microscópico petrográfico (figura 9A), utilizado para identificar y examinar aquellos minerales traslucidos y transparentes de sección delgada de acuerdo a la interpretación de la textura de la roca y a sus propiedades ópticas (Franco & Gonzalo, 2000).

El microscopio petrográfico está constituido por dispositivos ópticos como objetivo polarizante, ocular y fuente de iluminación que por lo general se encuentran en cualquier tipo de microscopio y se utilizan para aumentar el tamaño de la imagen a analizar. La luz polarizada es la encargada de vibrar en un solo plano a través de la línea de propagación. Esta luz se obtiene mediante el uso de dos prismas de calcita, uno que se encuentra ubicado por encima de la muestra de la roca llamado analizador y otro que se encuentra por debajo de la muestra llamado polarizador y están perpendiculares entre sí a los planos de vibración (Franco & Gonzalo, 2000).

Figura 9. A Esquema microscopio petrográfico **B** Trayectoria de la luz

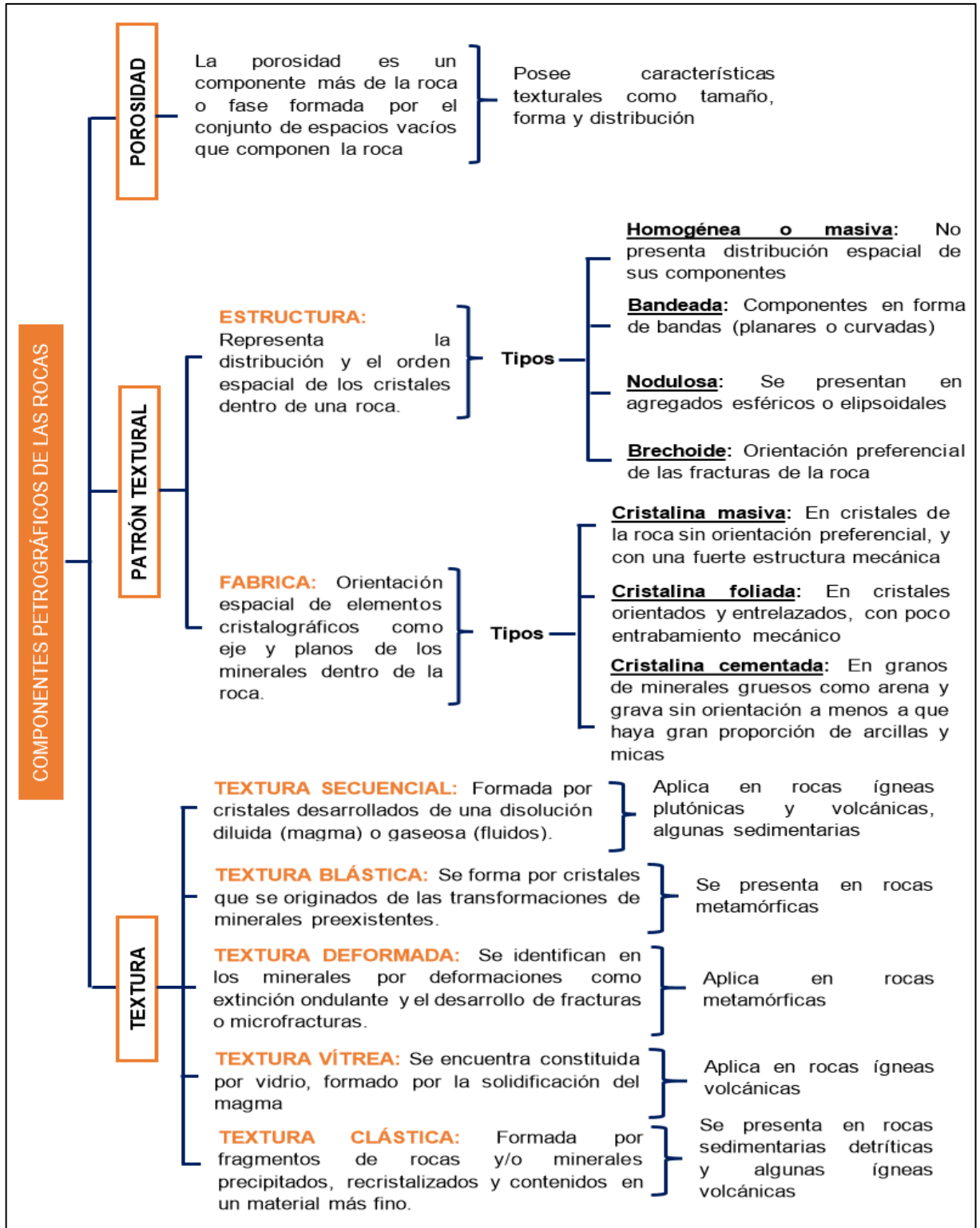


Fuente: Documento "Taller de petrología: enseñanza de la petrología con el microscopio petrográfico" (Franco & Gonzalo, 2000)

5.1.1. Componentes petrográficos

Los componentes petrográficos son los componentes de la roca con entidad física como granos minerales, asociaciones específicas de cada mineral, fragmentos de roca, material criptocristalino (Vidrio volcánico y geles de sílice) o pueden ser los constituyentes de la matriz y cemento, espacios vacíos como poros o fracturas discretas, entre otros. Algunos componentes petrográficos se presentan en todos los tipos de rocas, ya sea en granos minerales o poros, comúnmente observados en rocas de tipo ígneo (Volcánicas) o de tipo sedimentario; y en algunas rocas metamórficas e ígneas plutónicas, pero son muy reducidos. Otros componentes como el vidrio volcánico se presentan en las rocas magmáticas volcánicas u otros fracturas se evidencian en los tipos rocosos (Romero Buitrago, 2010).

Figura 10. Componentes petrográficos de las rocas



Fuente: Documento de (Romero Buitrago, 2010)

La caliza y la dolomía son rocas que se consideran como cuerpos porosos, debido a que están formadas por fases minerales sólidas, ya sea espacios vacíos ocupados por fases diluidas como el aire y agua. La porosidad es el conjunto de espacios que posee la roca, generada por las fisuras que pueden ser de fracturas a exfoliaciones y bordes de grano abiertos. La porosidad y la figuración hacen parte del sistema poroso y su análisis es de tipo descriptivo principalmente (Alfonzo, 2006).

Algunos métodos como la observación visual, microscopía óptica de polarización (MOP), la microscopía electrónica de barrido (MEB), la microscopía de fluorescencia, entre otros; pueden realizarse para el estudio de la porosidad y por lo general, la observación se efectúa con una preparación adecuada de las muestras pulidas (Alfonzo, 2006).

5.1.2. Procedimiento del análisis petrográfico

Los estudios petrográficos se realizan con una descripción visual inicialmente, detallando aspectos de la roca como su textura, color, dureza, tamaño de grano y si es posible, reconocer sus minerales. Posteriormente se efectúan las observaciones microscópicas identificando características como su composición mineralógica, forma y color de los cristales, y material cementante. (Gmas Laboratorio de geología, 2017)

Las secciones delgadas que se emplean para realizar la microscopía óptica o petrografía, son láminas delgadas de muestras de roca, cortadas y pulidas con un espesor de 0.03 mm y unas dimensiones de 3 cm de ancho por 5 cm de largo, que se sitúan sobre unos portaobjetos de vidrio de resina. La función principal de estas laminas es la de tener un espesor lo más pequeño posible que permita que la luz se transmita (Franco & Gonzalo, 2000).

Figura 11. Sección delgada en petrografía



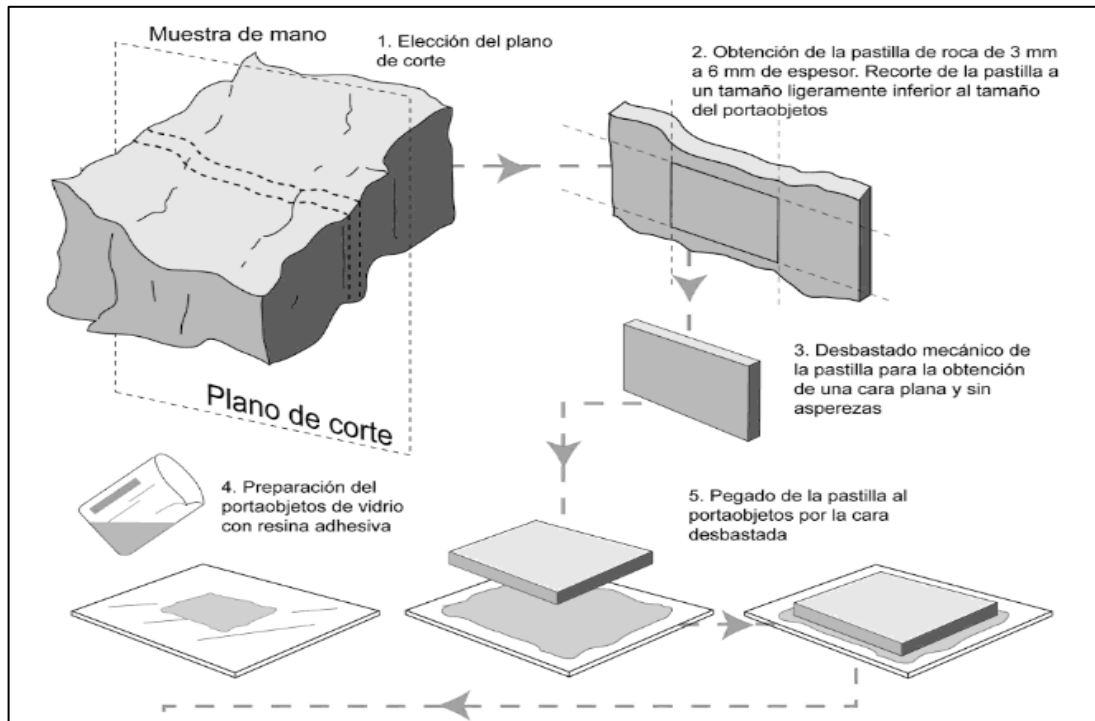
*Fuente: Página oficial de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
(Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2017)*

Para estudios más completos y específicos que los que se obtienen en la petrografía es posible emplear técnicas que tengan mayor nivel de detalle, como es el caso de los Rayos X y el microscopio electrónico. (Servicio Geológico Mexicano, 2017)

5.1.3. Preparación de las muestras para un análisis petrográfico

Para la observación de las rocas por medio del microscopio petrográfico, inicialmente se requiere de una lámina de sección delgada. En la figura 12 se presentan los pasos correspondientes para la elaboración de una lámina delgada de roca. Es importante realizar un adecuado acabado de la roca para la observación en el microscopio, este se hace por medio de equipos automáticos o semiautomáticos; sin embargo, se recomienda efectuar un acabado final manual utilizando abrasivos por lo menos de una micra de diámetro o inferior, con el fin de obtener un mejor análisis. El espesor de la sección debe ser conocido, ya que por medio del mismo se pueden identificar algunas propiedades ópticas, como el color natural o el color de interferencia. (Dorado, 2015)

Figura 12. Esquema de la elaboración de una lámina de sección delgada de roca a partir de una muestra de mano



Fuente: Libro "Petrografía de las rocas ígneas y metamórficas" (Dorado, 2015)

5.1.4. Tipo de observaciones al microscopio petrográfico

Al emplear un microscopio petrográfico, se debe tener en cuenta que la observación y el análisis de la roca se realicen de forma ordenada. Esta observación se puede presentar de tres tipos, según el sistema de polarización e iluminación; luz natural, luz polarizada y luz convergente. Con cada uno de ellos es posible obtener diversos tipos de información, que en su conjunto nos permite obtener una observación detallada de los minerales.

➤ Observaciones en luz natural

Este sistema se basa en la observación por medio de un polarizador o prisma inferior, el cual no debe cruzar el polarizador superior (analizador). Con este tipo de observación es posible identificar el color, la exfoliación y el relieve de los minerales. El relieve (índice de refracción comparado con los minerales circundantes) es una

de las principales características de los minerales al microscopio junto con el color. En una lámina de sección delgada, los minerales “oscuros” normalmente presentan diversa gama de colores que permiten identificarlo. Por otro lado, los minerales que presentan varios colores, pueden ser pleocróicos, es decir, que el color cambia en relación a la posición de los índices respecto al plano del prisma inferior (Dorado, 2015).

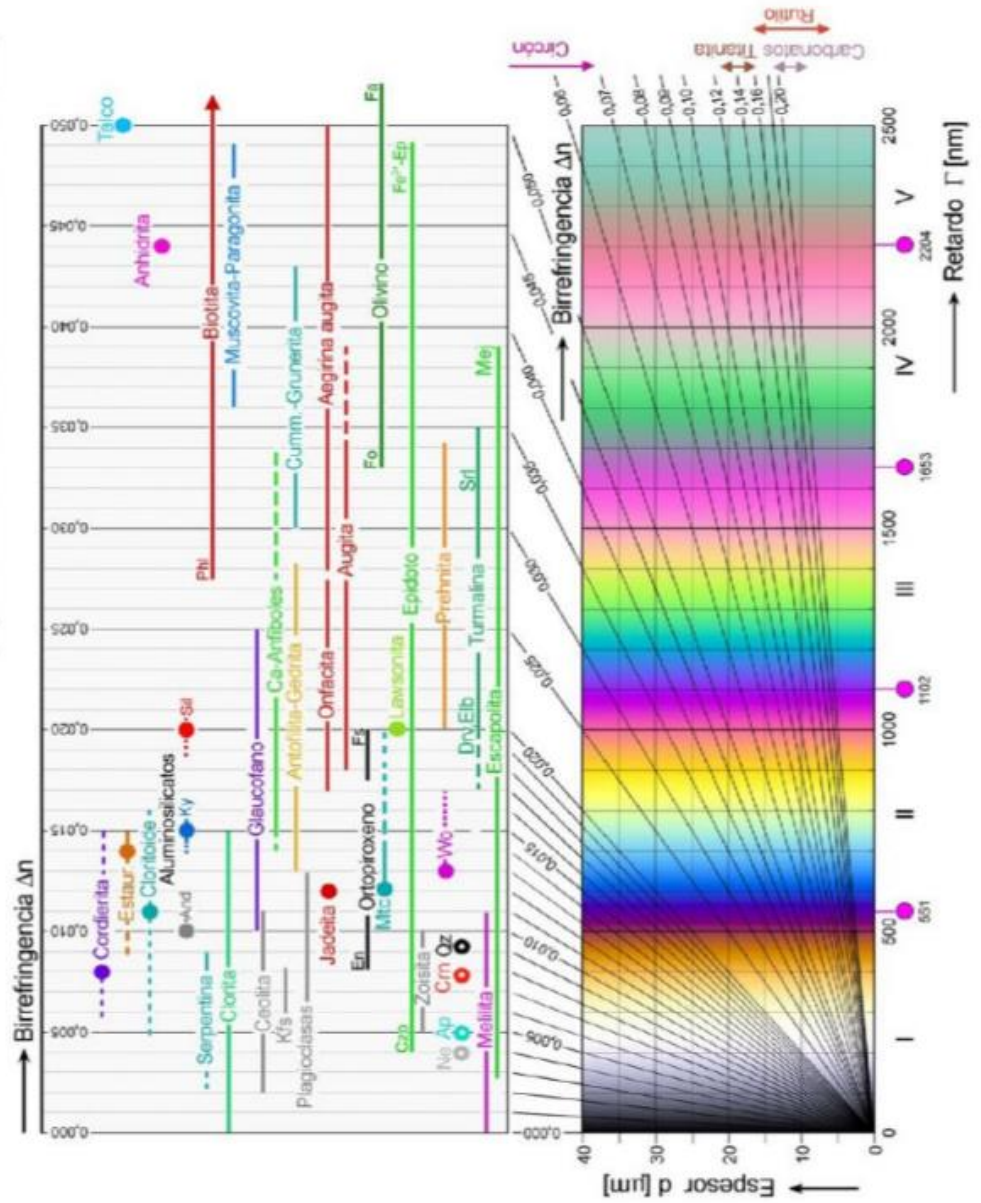
➤ **Observaciones en luz polarizada**

Las observaciones se realizan con dos prismas cruzados. Al igual que en las observaciones con luz natural, el color es una característica fundamental para la identificación del mineral. En este tipo de observación, el color es el resultado de la interferencia de la luz con el mineral, este se denomina color de interferencia o de birrefringencia, que es la diferencia entre los índices de refracción; es posible identificarlo por medio de la tabla de Michael – Lévy mostrada en la figura 13. Es conveniente conocer el espesor de la lámina delgada con exactitud, como se mencionó, no obstante, el color de interferencia no solamente es un rango característico en las observaciones con luz polarizada, sino que existe otro llamado ángulo de extinción, que es el ángulo formado entre uno de los índices de refracción y una traza de un eje de simetría conocido. Cualquiera de estos rangos varían de acuerdo a la composición de los minerales que forman las soluciones sólidas, como plagioclasas, piroxenos, anfíboles, etc (Dorado, 2015).

Figura 13. Documento: "Carta de colores de interferencia de Michel – Levy"

Carta de colores de interferencia de Michel-Lévy

(Espectro de colores calculado con Matlab. B. E. Sørensen, 2011)



Fuente: Libro "Constituents, textures, cements and porosities of sandstones and associated rocks" (Scholle, 1979)

➤ **Observaciones en luz polarizada convergente**

Mediante un polarizador superior cruzado, es posible realizar las observaciones en luz polarizada convergente. Por medio de este polarizador es posible identificar las figuras de interferencia con el objetivo de determinar el signo óptico del mineral. Estas figuras se producen introduciendo la lente de Bertrand o retirando el ocular del microscopio; y pueden estar formadas por una cruz extinguida conocida como la figura uniáxica o por dos ramas hiperbólicas en dos cuadrantes opuestos del retículo llamadas figuras biáxicas. Por medio de estas figuras de interferencia es posible distinguir los minerales uniáxicos (un eje óptico), por sus sistemas trigonal, hexagonal y tetragonal; de los minerales biáxicos (dos ejes ópticos) con sus sistemas monoclinicos, triclinicos y rómbicos (Dorado, 2015).

5.1.5. Identificación de minerales al microscopio petrográfico

Algunas características de los minerales (cuarzo, feldespatos, micas, anfíbol, piroxeno y carbonatos) observadas por medio del microscopio petrográfico como el color de interferencia, el relieve y el signo óptico, se resumen en la figura 14.

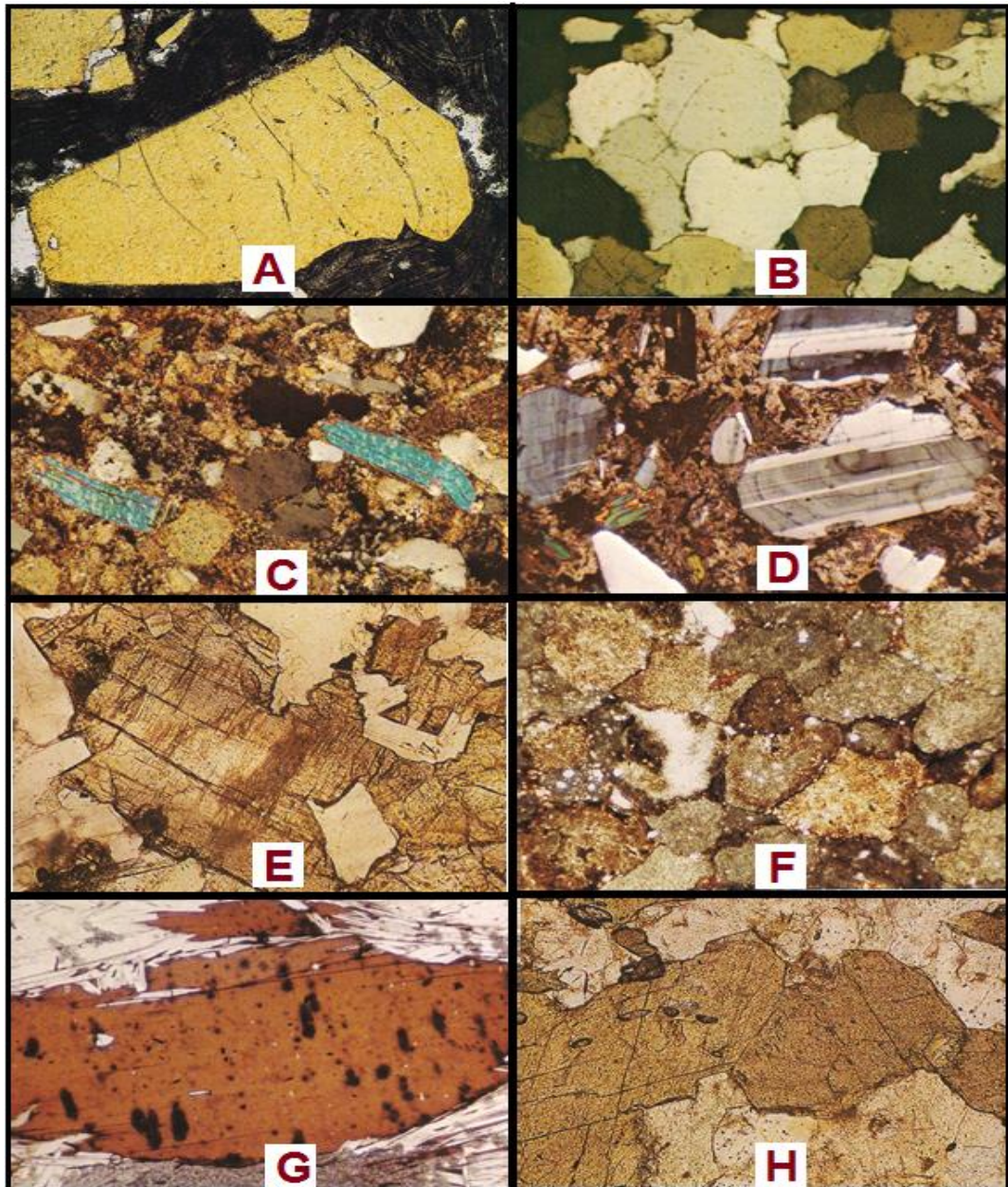
Figura 14. Características al microscopio de los minerales

CARACTERÍSTICAS AL MICROSCOPIO DE LOS MINERALES						
Mineral	Color	Color de interferencias	Relieve	Signo óptico	Otras características	
Cuarzo	Incoloro	Grises altos y blancos de primer orden	Medio	Positivo	-Generalmente presenta extinción ondulante	
Feldespato	Feldespato potásico	Blanco amarillento, rosado o rojo, en ocasiones verde	Grises de primer orden	Bajo	Biáxico negativo	-En ocasiones presenta planos de exfoliación en dos direcciones (perpendiculares entre sí)
	Plagioclasa	Incoloro (Puede tener aspecto turbio por alteración)	*Grises de primer orden (Plagioclasa pobres en calcio) * Amarillos y grises (Plagioclasa ricas en calcio)	Bajo (+)	Biáxico (+ -)	-Líneas de exfoliación en una sola dirección.
Micas	Moscovita	Incoloro	Presenta colores azules (principal), rojos y amarillos de tercer orden	Medio	Biáxico (-)	-Presenta ángulos de exfoliación rectos
	Biotita	Marrón, verde, rojo (Hasta casi negro)	Amarillo y marrón de tercer y cuarto orden	Medio	Bióxido (+) Uniáxico (-)	- Presenta extinción recta a 90° (Sentido este oeste) - Presenta un sistema de exfoliación con ángulos rectos.
Anfíbol	Verde, amarillo y marrón en tonos fuertes y pálidos	Marrones, amarillos y verdes	Moderado a alto	Biáxico (-)	-Forma del mineral hexagonal - Presenta un sistema de exfoliación con ángulos menores a 90° (ángulos agudos)	
Piroxenos	Pardo, verdoso a casta; o y grisáceo; amarillento, blanco	Presenta colores rojos, naranjas y amarillos de segundo y tercer orden	Alto	Biáxico (+ -)	-Presenta un sistema de exfoliación con ángulos de 90°	
Carbonatos	Calcita	Incoloro	Alto orden: Blanco y crema	Bajo, medio (+ -), alto	Uniáxico (-)	
	Dolomitas	Incoloro	Color café de primer orden	Bajo, medio (+ -)	Uniáxico (-)	

Fuente: Autores y Director de Grado Javier Eduardo Becerra Becerra.

Los principales minerales observados por medio del microscopio petrográfico son (figura 15)

Figura 15. Identificación de algunos minerales al microscopio petrográfico. (A). Feldespato potásico (B). Cuarzo (C). Moscovita (D). Plagioclasa (E). Anfíbol (F). Carbonato de calcio (G). Biotita (H). Piroxeno



Fuente: Libro "Constituents, textures, cements and porosities of sandstones and associated rocks" (Scholle, 1979)

5.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

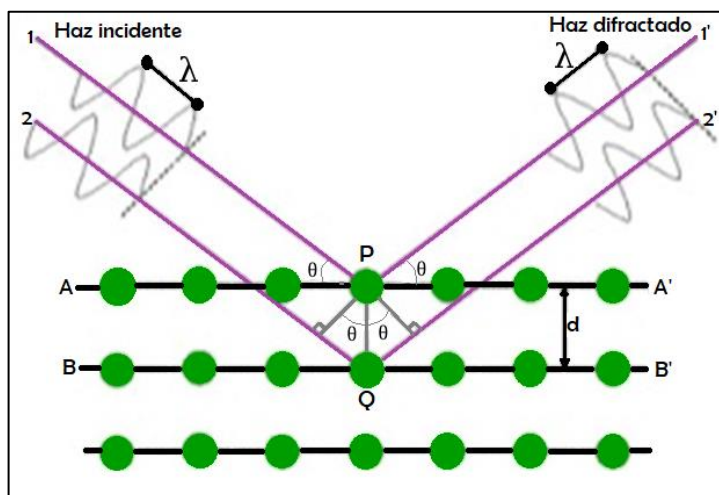
La difracción de rayos x (DRX ó XRD) es una técnica que consiste en hacer interactuar un haz de rayos x, que tiene una longitud de onda determinada, con un material cristalino. El resultado obtenido es la difracción de rayos x, es decir, la dispersión de los mismos, que, de acuerdo con la distancia entre los átomos, se difractan con ángulos específicos.

La difracción de rayos x se caracteriza por ser un método que emplea alta tecnología, por ser de tipo no destructivo y que permite el análisis de diferentes materiales. Dentro de los resultados que se obtienen a partir de la difracción de rayos x se destaca la composición mineralógica de una muestra, además de identificar el tamaño de los cristales, el coeficiente de dilatación térmica y la simetría del cristal (Universidad de Alicante, 2017).

La difracción de rayos x se diferencia de la fluorescencia de rayos x, identificada como técnica elemental, en que esta última únicamente permite determinar los átomos que se encuentran en una muestra determinada, mientras que la difracción de rayos x, permite conocer, además, qué tipos de moléculas conforman dichos átomos, ya que las distancias atómicas son diferentes en compuestos similares. Por lo cual es posible distinguir entre compuestos que tiene átomos iguales y en la misma cantidad, como es el caso de la Calcita (CaCO_3) y la Aragonita (CaCO_3), los cuales se pueden distinguir completamente a partir de la DRX (Pontificia Universidad de Chile, 2017).

Para la difracción de rayos x, la técnica más difundida es la Ley Bragg, que “relaciona la longitud de onda de los rayos X y la distancia interatómica con el ángulo de incidencia del haz difractado” (Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación, 2017).

Figura 16. Difracción de rayos x.

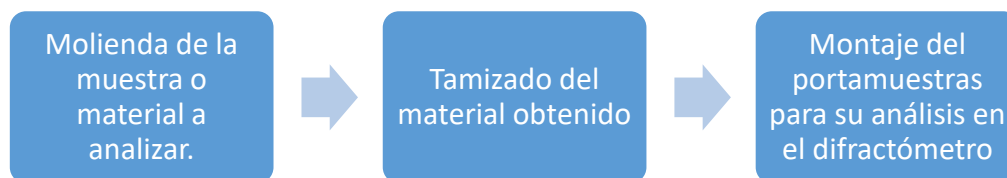


Fuente: Página oficial Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación.

5.2.1. Preparación de la muestra

Para realizar la difracción de rayos en una muestra de roca o material rocoso, es necesario llevar a cabo los pasos que se muestran en el siguiente esquema: (Macias, 2017)

Figura 17. Proceso de preparación de la muestra.



5.2.2. Procedimiento para la difracción de rayos x

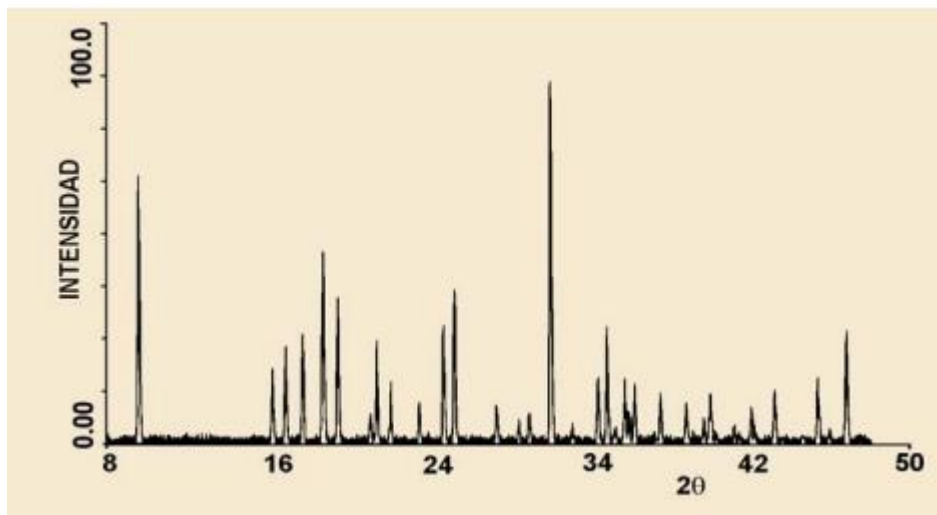
Esta técnica emplea muestras sólidas o pulverizadas, generalmente de esta última forma, tamizadas en un tamaño no mayor a $53 \mu\text{m}$ y posteriormente el material es ubicado de forma adecuada en el portaobjetos. Empleando el difractómetro se hace incidir un haz de rayos X sobre la muestra, de tal forma que los rayos difractados, generados por los cristales y minerales presentes en la muestra, se registran y se analizan mediante un ordenador, obteniéndose así el difractograma. Es preciso

mencionar que los rayos difractados son particulares según el tipo de mineral sobre el cual incide.

5.2.3. Difractograma.

A continuación, se observa un difractograma típico. “Las intensidades se toman como alturas de los picos o para trabajos de más precisión las áreas. Al pico más intenso se le asigna un valor de 100 y el resto se reescala respecto a éste”. (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2017)

Figura 18. Difractograma típico



Fuente: Documento “Difracción de rayos X, introducción (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2017)

A partir del difractograma es posible determinar las distancias interplanares mediante la ley de Bragg y determinar las intensidades relativas mediante el área bajo los picos generados por la composición cristalográfica de la muestra.

5.2.4. Aplicaciones

La técnica de difracción de rayos X tiene gran cantidad de aplicaciones que permiten describir completamente una muestra cristalográfica. A continuación, se listan algunas de sus aplicaciones (Macias, 2017).

- Determinación cristalográfica y mineralógica de la muestra analizada.
- Análisis cuantitativo y cualitativo de las fases presentes en la muestra.
- Estudios de transformación de las fases de la muestra en función de la temperatura.

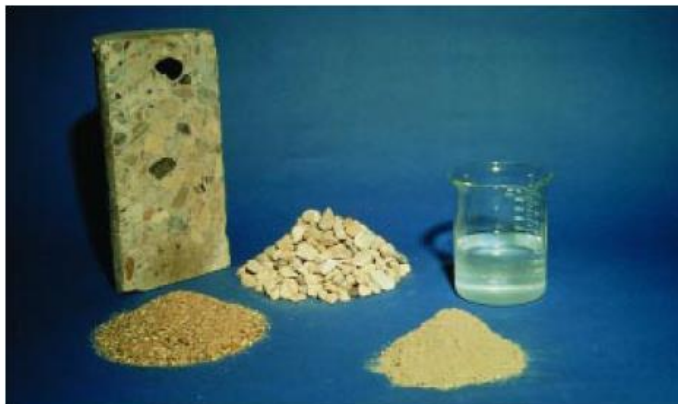
- Determinación del tamaño de los cristales.
- Determinación de estructuras cristalinas.
- Estudio de texturas.
- Control de calidad de materias primas y productos finales.
- Detección de imperfecciones cristalinas.}

6. EL CONCRETO Y SUS CARACTERÍSTICAS

El concreto se conoce como el material más empleado en la industria de la construcción debido a las características de duración, resistencia, impermeabilidad, facilidad de producción y economía que presenta; además de ser diseñado y producido de acuerdo con ciertas normas que regulan su producción de acuerdo con su aplicación y las características del proyecto en el cual será empleado. El concreto se caracteriza por presentar alta resistencia a la compresión, de igual forma que las rocas naturales, sin embargo, presenta una baja resistencia a la tracción, que por lo general corresponde al 10% de su resistencia a la compresión, por lo que se hace necesario reforzarlo con varillas de acero que soporten los esfuerzos a flexión (Gutiérrez de Lopez, 2003).

El concreto es un material que se asemeja a la piedra, que ha sido creado por el hombre y que está compuesto por una mezcla proporcionada de cemento, arena, grava y agua. El cemento, junto con el agua, reaccionan químicamente y al interactuar unen las partículas del agregado formando una masa sólida. Es fundamental agregar agua, además de la necesaria para la reacción, con la intención de que la mezcla tenga la consistencia necesaria para verter el concreto en las formaletas y que este pueda rodear el acero de refuerzo antes de iniciar su proceso de endurecimiento. (Nilson, 2001)

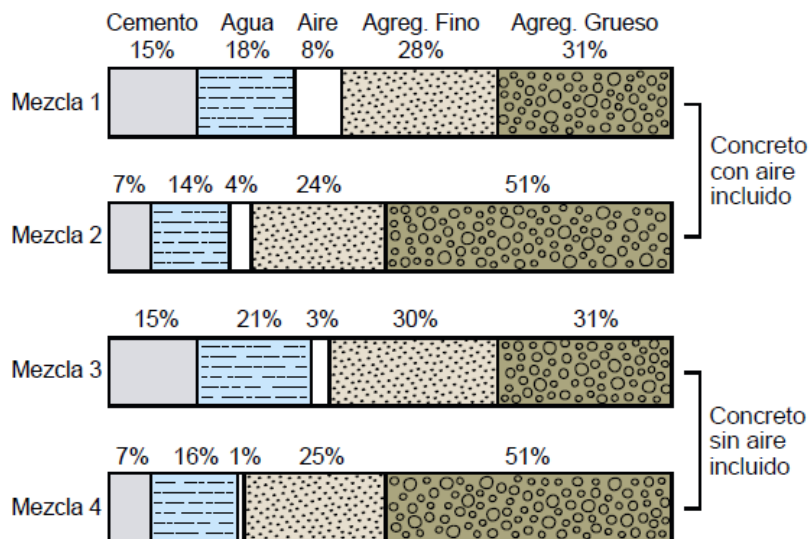
Figura 19. Componentes del concreto: cemento, agua, agregado fino, agregado grueso.



Fuente: Libro "Diseño y control de mezclas de concreto" (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

La denominada "pasta" del concreto está formada por el cemento o material cementante, el agua y el aire atrapado o aire incluido que haya sido incorporado de forma intencional. Esta pasta forma entre el 25% y el 40% del total de la mezcla, aproximadamente. Generalmente el contenido de cemento varía entre el 7% y el 15%; el volumen de agua varía entre el 4% y el 8% del volumen total como se observa en la siguiente imagen.

Figura 20. Variación de las proporciones usadas en concreto, en volumen absoluto.



Fuente: Libro "Diseño y control de mezclas de concreto" (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

La selección adecuada de los agregados empleados en la elaboración del concreto es de suma importancia, puesto que estos constituyen entre el 60% y el 75% del volumen total del concreto. Es por ello que los agregados deben contar con características como una resistencia a la compresión adecuada, durabilidad ante condiciones de exposición ambiental y estar exento de materiales que puedan generar el deterioro del concreto. La granulometría es otra de las características que se deben evaluar en los agregados empleados en el concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

6.1. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO RECIÉN MEZCLADO

El concreto en estado fresco debe ser plástico o semifluido es decir que sea flexible y capaz de permitir su moldeado al igual que un terrón de arcilla. Una mezcla plástica se caracteriza primordialmente porque la arena y la grava se mantiene en suspensión, es decir que la mezcla es homogénea, por lo que se debe evitar la segregación de la misma durante su transporte o colocación.

En la práctica, una mezcla debe ser trabajable de forma tal que su colocación sea lo más fácil posible en elementos que son muy esbeltos o que se encuentran bastante reforzados (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

6.1.1. Mezclado

Para garantizar un correcto mezclado del concreto es necesario esfuerzo y cuidado que permitan obtener una mezcla homogénea. Para ello, un factor importante es la secuencia de carga de los ingredientes en la mezcladora, aunque en ocasiones esta secuencia puede variar y producir de igual forma un concreto de buena calidad. Sin embargo, la adición de agua, el número de revoluciones, la velocidad de mezclado y el volumen del concreto que se mezcla con relación al volumen de la mezcladora, son factores que influyen directamente en el correcto mezclado para obtener un concreto de buena calidad (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

6.1.2. Manejabilidad

La manejabilidad hace referencia a la facilidad con que el concreto, en estado fresco, permite ser colocado, compactado adecuadamente y evita fenómenos de segregación y exudación. La manejabilidad es una propiedad del concreto que está relacionada con la plasticidad, que se define como la capacidad que tiene de dejarse moldear.

La manejabilidad se diferencia de la consistencia o fluidez en que esta última está directamente relacionada con el grado de humedad de la mezcla, que puede ser seca (dura) o fluida (blanda). Sin embargo, una forma indirecta de medir la manejabilidad de una mezcla de concreto es a través del ensayo de asentamiento con el cono o slump tal como se describe en la NTC 396, ya que a partir de la medición de la consistencia de la mezcla es posible detectar variaciones en la uniformidad de la misma y tener una idea de su trabajabilidad (Gutiérrez de Lopez, 2003).

6.1.3. Consolidación

La consolidación, también denominada vibración del concreto busca mover las partículas de la mezcla reduciendo la fricción entre ellas. El proceso de vibración permite el empleo de mezclas más rígidas que contienen mayores proporciones de agregado grueso y menores de agregado fino. La consolidación es un proceso que permite mejorar la calidad y la economía del concreto incluso en mezclas rígidas. El proceso de consolidación es fundamental para obtener un concreto de buena calidad; una mala consolidación o ausencia de ella puede resultar en concretos porosos, débiles y de poca durabilidad (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

6.1.4. Hidratación

Al elaborar la mezcla de concreto, no se debe usar más agua de la que se requiere de forma precisa para lograr las propiedades de plasticidad y manejabilidad adecuadas. En la construcción, la cantidad de agua que se usa generalmente es mayor a la requerida para la hidratación completa del cemento. De forma aproximada se requieren 0,4 gramos de agua por cada gramo de cemento para lograr una hidratación adecuada del concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

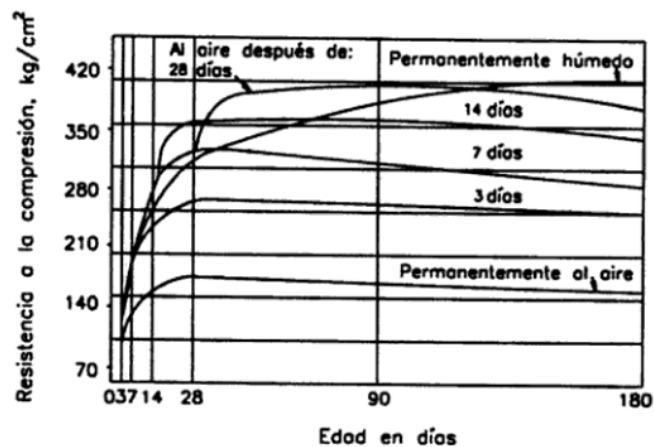
6.2. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO ENDURECIDO

El concreto en estado endurecido debe contar con características como resistencia, durabilidad, peso unitario, permeabilidad y resistencia a la abrasión; estas propiedades están directamente relacionadas con un adecuado proceso de curado.

6.2.1. Curado

El curado se define como el proceso cuyo fin es mantener el concreto saturado hasta lograr que los espacios de cemento fresco, llenos de agua en un principio, sean reemplazados por productos de la hidratación del cemento. El curado busca regular la temperatura y la humedad dentro y fuera del concreto, evitando la contracción del concreto. A continuación, se observa que, a mayor tiempo de curado, la resistencia del concreto aumenta.

Figura 21. Efecto del tiempo de curado del concreto en la resistencia del concreto a la compresión.



Fuente: Libro "Diseño de estructuras de concreto armado" (Harmsen, 2005)

El proceso de curado se puede realizar con agua, con materiales sellantes y con vapor. El curado con agua se puede realizar por inmersión, con rociadores, con coberturas húmedas como yute y empleando tierra, arena o aserrín sobre el concreto (Harmsen, 2005).

6.2.2. Resistencia

La resistencia a la compresión es la máxima carga axial que resisten los especímenes de concreto. Generalmente esta medida se realiza a los 28 días, sin embargo, existen relaciones entre las resistencias a los 28 días y las demás edades. Generalmente, se estima que la resistencia a los 7 días es aproximadamente el 75% de la resistencia a los 28 días. La resistencia a los 56 y a los 90 días es aproximadamente 10% y 15% mayor a la que se obtiene a los 28 días.

La resistencia a la compresión que logra el concreto es generalmente función de la relación agua/cemento, la hidratación, el curado, las condiciones ambientales y la edad que tiene el concreto.

El concreto de uso comercial tiene resistencias a la compresión que varía entre 20 y 40 MPa (3000 y 6000 lb/pulg²) (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Los factores que influyen directamente en la resistencia a la compresión que alcanza el concreto se pueden clasificar en dos: aquellos que están relacionados con los materiales que componen el concreto, como el agua, el cemento y los agregados; y aquellos relacionados con los procesos de mezclado, transporte, colocación, compactación y curado. En cuanto a la primera clasificación se encuentran los siguientes factores:

Tabla 3. Factores que influyen en la resistencia a la compresión del concreto.

FACTOR	DESCRIPCIÓN
Contenido de cemento	A medida que se aumenta la cantidad de cemento en la mezcla aumenta la resistencia, sin embargo cuando el contenido de cemento supera los 470 kg por m ³ de concreto, la resistencia presenta un retroceso generalmente cuando los tamaños máximos son muy grandes.
Relación agua-cemento	Una relación de agua-cemento determinada puede generar diferentes resistencias de acuerdo con el tipo de agregado utilizado y el tipo de cemento.
Influencia de los agregados	Las propiedades de los agregados empleados en la mezcla son determinantes en la resistencia del concreto, estas propiedades son: <ul style="list-style-type: none"> - Tamaño máximo del agregado. - Granulometría. - Forma y textura. - Resistencia y rigidez de las partículas del agregado.

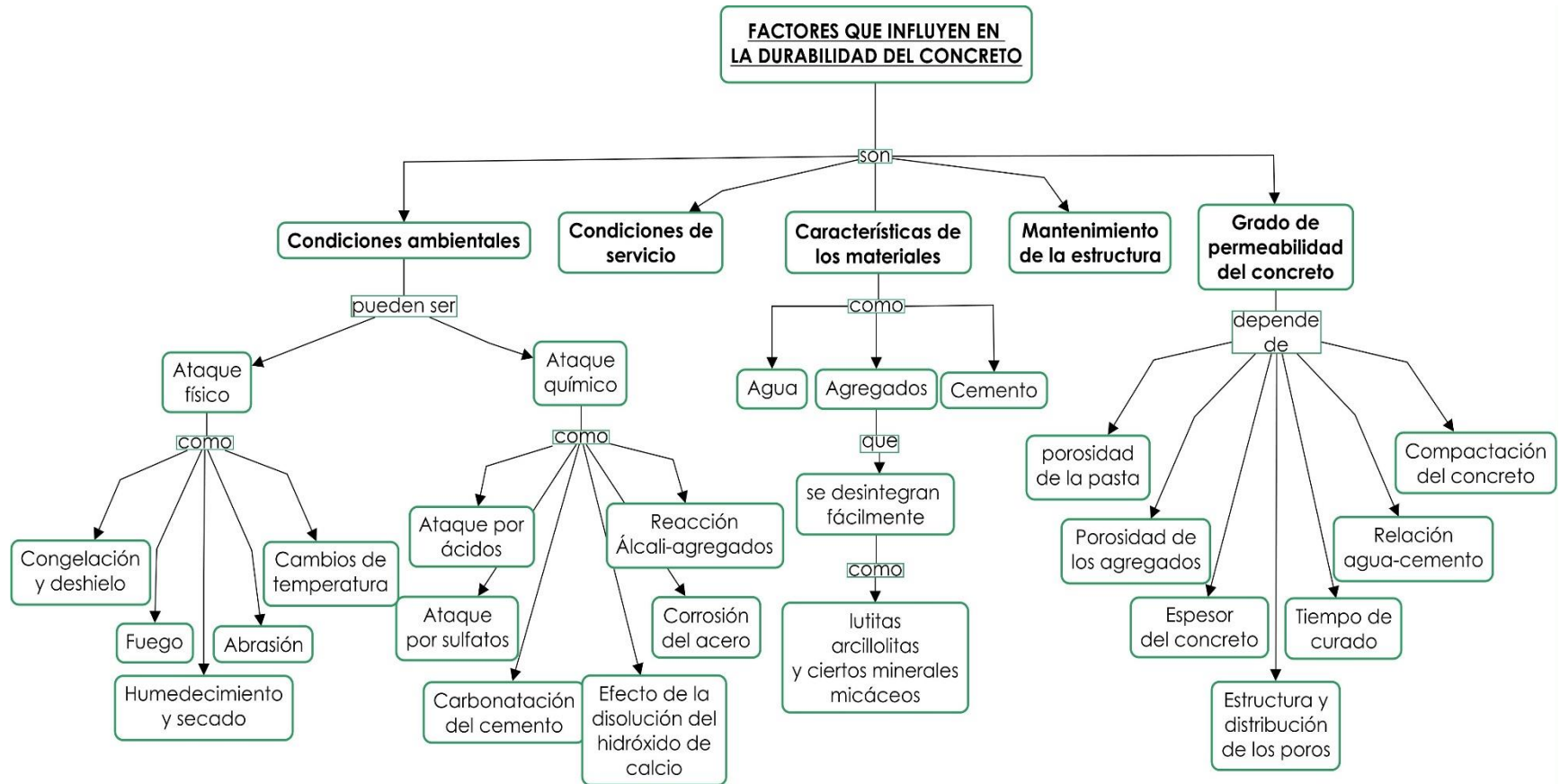
Fuente: Libro "El concreto y otros materiales para la construcción" (Gutiérrez de Lopez, 2003)

6.2.3. Durabilidad

La durabilidad es la propiedad del concreto de conservar sus propiedades originales frente a las acciones del medio ambiente, al ataque químico y a la abrasión. La durabilidad del concreto está sujeta al medio al que se encuentra expuesto o a causas internas del mismo. Dentro de las causas externas se resaltan las

condiciones atmosféricas, temperaturas extremas, ataque por líquidos o gases, entre otros. Dentro de las causas internas se encuentran la reacción álcali-agregado, cambios de volumen relacionados con las diferencias térmicas entre el agregado y el mortero, y por la permeabilidad del concreto. En el siguiente esquema se resumen los factores que están directamente relacionados con la durabilidad del concreto (Rivera G. , 2013).

Figura 22. Factores que influyen en la durabilidad del concreto.



Elaborado con base a "El concreto y otros materiales para la construcción" (Gutiérrez de Lopez, 2003).

6.2.4. Permeabilidad

La permeabilidad hace referencia a la habilidad que tiene el concreto para permitir el paso de agua o cualquier otro líquido, gas o vapor (Quiroz, Salamanca, & Antezana, 2006).

La permeabilidad del concreto se encuentra en función de:

- La permeabilidad de la pasta
- La permeabilidad y granulometría del agregado.
- La calidad de la pasta y la zona de transición del agregado.
- La proporción relativa de la pasta y agregado.

Es fundamental resaltar que una disminución en la permeabilidad aumenta la resistencia del concreto al congelamiento y deshielo, la penetración de sulfatos y de iones cloruro y otros ataques químicos (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

En los casos del concreto reforzado, la permeabilidad da como resultado la corrosión del acero, lo que aumenta su volumen, generando así agrietamiento del concreto y pérdida de adherencia entre el acero y el hormigón.

6.2.5. Peso unitario (densidad)

El peso unitario, peso específico, peso volumétrico, densidad o masa unitaria del concreto convencional; varía entre 2200 hasta 2400 kg/m³. Esta propiedad del concreto varía según la cantidad y densidad del agregado empleado, el aire atrapado o incluido y la relación agua-cemento del mismo.

7. AGREGADOS PARA EL CONCRETO

Debido a que cerca del 60% al 75% del volumen total del concreto está formado por los agregados fino y grueso, es de gran importancia el uso del tipo y la calidad adecuados del agregado, ya que influyen directamente en las propiedades del concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

7.1. CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS

Los agregados se pueden clasificar de tres formas, según su procedencia, según su tamaño y según su gravedad específica.

7.1.1. Según su procedencia.

Según el origen de los agregados, estos se pueden clasificar en agregados naturales y en agregados artificiales.

- **Agregados naturales.**

Los agregados naturales son aquellos que provienen de la explotación de canteras o que han sido arrastrados por los ríos. Los agregados naturales a su vez se pueden clasificar en materiales de cantera y materiales de río, distinción que es importante mencionar ya que el material de río, debido a los procesos de transporte posee una textura lisa y forma redondeada; en comparación a los agregados de cantera que son más rugosos y angulosos (Gutiérrez de Lopez, 2003).

Los agregados naturales son producto de diferentes procesos geológicos, según los cuales las rocas se clasifican en ígneas, sedimentarias y metamórficas.

- Rocas ígneas.

Las rocas ígneas son aquellas formadas durante los procesos de enfriamiento y fragmentación del magma. Las condiciones bajo las cuales se dan estos procesos determinan la textura, el tipo, el tamaño, la forma y el grado de cristalinidad de los componentes de la roca (Jaramillo, 2002).

Figura 23. Muestra de roca ígnea.



Fuente: (Rivera G. , 2013)

A continuación, se presenta una tabla resumen de la clasificación de las rocas ígneas según la velocidad de solidificación del magma y el lugar de consolidación.

Tabla 4. Clasificación de las rocas ígneas según su velocidad de consolidación y localización (origen).

DENOMINACIÓN	VELOCIDAD DE SOLIDIFICACIÓN	LOCALIZACIÓN
Intrusivas, abisales o plutónicas	Lenta	Consolidadas a gran profundidad
Filonianas o hipo abisales	Media	Consolidadas a profundidad media
Extrusivas, efusivas o volcánicas	Rápida	Consolidación cerca o sobre la superficie (por alguna erupción)

Fuente: Libro "Concreto simple" (Rivera G. , 2013).

- Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias son aquellas formadas a partir de los procesos de meteorización y erosión de rocas ígneas, metamórficas u otras sedimentarias, que producen partículas de diferentes tamaños y que a su vez son transportadas por agentes como el hielo, el agua o el aire hasta zonas en las que se acumulan, transformándose en roca debido a procesos de consolidación o litificación de los sedimentos (Duque, 2016).

A continuación, se presenta de forma resumida la clasificación de las rocas sedimentarias.

Tabla 5. Clasificación de las rocas sedimentarias, origen mecánico.

ORIGEN	AGENTE	DEPOSITO	ROCA
Mecánico	Agua	Canto rodado Guijarro Arena Limo Arcilla	Conglomerados Brechas, aglomerados Areniscas Limolitas, lodolitas Arcillolitas, lutitas
	Viento	Médanos o dunas Loess (limo)	Areniscas Limolitas
	Hielo	Till (peñascos en una matriz fina)	Morrenas y otras tilitas (peñascos en una matriz fina pero consolidados)

Fuente: Libro "Manual de geología para ingenieros" (Duque, 2016).

Tabla 6. Clasificación de las rocas sedimentarias, origen químico y orgánico.

ORIGEN	NATURALEZA	SEDIMENTO CONSOLIDADO
Químico	Calcárea Calcárea-arcillosa Silicosa Salina (evaporitas)	Caliza, dolomía, travertino Marga Pedernal, geiserita Sal, yeso, bórax
Orgánico	Carbonosa (% de C libre)	Turba C<50%: carbón compresible y de formación reciente Lignito C ≈ 50%: carbón de formación Hulla C ≈ 75%: carbón fósil o mineral

Fuente: Libro "Manual de geología para ingenieros (Duque, 2016)

- Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son aquellas que se originan a partir de rocas ya existentes, ígneas o sedimentarias, cuando son sometidas a altas presiones y/o temperaturas, produciéndose cambios químicos-estructurales en los minerales de las rocas originales que dan como resultado un reordenamiento de los minerales presentes en la roca, que dan a las rocas metamórficas su foliación característica (Jaramillo, 2002).

En el siguiente cuadro se presentan las rocas metamórficas, su roca de origen o base y su intermedia.

Tabla 7. Rocas metamórficas

ROCA BASE	ESTADO DE TRANSICIÓN	ROCA METAMÓRFICA
Shale (lutita)	Metasedimentos	Pizarra, filita, esquisto, paragneis.
Arenisca	Metasedimentos	Cuarcita, hornfels
Caliza	Caliza cristalina	Mármol
Basalto	Metavulcanita	Esquisto, anfibolita
Granito	Intrusivo gnésico	Ortogneis
Carbones	Metasedimentos grafitosos	Esquistos grafitosos

Fuente: Libro "Manual de geología para ingenieros" (Duque, 2016).

- **Agregados artificiales.**

Los agregados artificiales hacen referencia a aquellos que son producto de procesos industriales tales como arcillas expandidas, escorias de altos hornos, limaduras de hierro, clinker, entre otros. En algunos concretos que no requieren de mucha resistencia se emplean residuos orgánicos como la cascara del arroz, de

palma o café, mezclándolos con los agregados naturales, de forma tal que se puedan reducir costos.

7.1.2. Según su tamaño.

Una de las clasificaciones más comunes de los agregados es según su tamaño. La clasificación unificada de suelos los clasifica en suelos finos, aquellos cuyo tamaño es menor a 0,074 mm o al tamiz N° 200 y en suelos gruesos, aquellos cuyo tamaño es mayor a 0,074 mm o mayor al tamiz N° 200. En el caso del concreto y el mortero, se emplean los suelos gruesos, limitando la cantidad presente de suelo fino.

La porción fina de los suelos gruesos se denomina agregado fino, que corresponde a las partículas cuyo tamaño se encuentra entre 4,76 mm (tamiz N° 4) y 0,074 mm (tamiz N° 200). Por su parte la porción gruesa se conoce como agregado grueso y sus partículas son aquellas que tiene un tamaño mayor a 4,76 mm (tamiz N° 4) (Rivera G. , 2013).

A continuación, se muestra una clasificación más específica de los agregados según su tamaño.

Tabla 8. Clasificación de los agregados según el tamaño de sus partículas.

TAMAÑO ENN mm	DENOMINACIÓN MÁS COMÚN	CLASIFICACIÓN	USO COMO AGREGADO DE MEZCLAS
<0,002	Arcilla	Fracción muy fina	No recomendable
0,002 – 0,074	Limo	Fracción fina	No recomendable
0,074 – 4,76 #200 - # 4	Arena	Agregado fino	Material apto para mortero o concreto
4,76 – 19,1 # 4 – ¾"	Gravilla	Agregado grueso	Material apto para concreto
19,1 – 50,8 ¾" – 2"	Grava		Material apto para concreto
50,8 – 152,4 2" – 6"	Piedra		
>152,4 6"	Rajón, Piedra bola		Concreto ciclópeo

Fuente: Libro "Concreto simple" (Rivera G. , 2013)

7.1.3. Según su gravedad específica.

Según su gravedad específica los agregados se pueden clasificar en ligeros, normales y pesados. En la siguiente tabla se describe cada uno y los concretos que se pueden producir a partir de dichos agregados.

Tabla 9. Clasificación de los agregados según su densidad.

TIPO DE AGREGADO	G _s	EJEMPLO DE AGREGADO	TIPO DE CONCRETO QUE PRODUCE	DENSIDAD DEL CONCRETO PRODUCIDO
Ligeros	<2,5	Arcilla esquistosa Arcilla expandida Escoria expandida Vermiculita Perlita Piedra Pómez Cenizas	Hormigón aislante Unidades de mampostería Estructural ligero	400 – 2000 kg/m ³
Normales	2,5 – 2.75	Arenas y gravas Roca triturada: Granito, Basalto, Arenisca, Piedra Caliza y Cuarzita. Escoria siderúrgica	Concreto de peso normal	2300 – 2500 kg/m ³
Pesados	>2,75	Magnetita Barita Hierro de desecho	Hormigón para blindaje contra la radiación Contrapesos de hormigón	2900 – 3500 kg/m ³

Fuente: Adaptado del Libro “Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje en la asignatura de Tecnología del Hormigón” (Quiroz, Salamanca, & Antezana, 2006)

7.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

Existe la necesidad de contar con concretos de calidad adecuada, lo que requiere conocer a detalle las características de sus componentes, ya que tanto la resistencia como la durabilidad de los mismos dependen de las propiedades químicas y físicas de estos, de forma especial de los agregados. A continuación se describen las características químicas, físicas y mecánicas de los agregados, junto con los requerimientos que se deben tener en cuenta para propiciar resultados esperados en el concreto (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003).

7.2.1. Propiedades químicas.

Dentro de las propiedades químicas de los agregados se destaca principalmente la reactividad álcali-agregado y la epitaxia. A continuación, se describe la reacción álcali-agregado.

- ***Reacción álcali-agregado***

La reacción álcali-agregado es una de las principales causas de deterioro del concreto. Esta reacción se genera entre los denominados agregados reactivos y los óxidos de sodio y de potasio presentes en el cemento (Na_2O , K_2O). Esta reacción se origina en la superficie del agregado y se produce en la interfase de la pasta, creando un gel que se dilata y genera presiones internas que conducen a la rotura del material (Romero Buitrago, 2010).

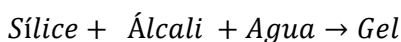
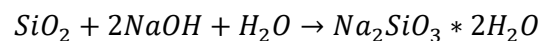
La reacción álcali-agregado ha sido estudiada desde 1938 cuando fue descubierta en Estados Unidos, en especial por Stanton quien realizó los primeros estudios. Esta reacción puede ser:

- Reacción álcali-sílice
- Reacción álcali-carbonato
- Reacción álcali-silicato

a) Reacción álcali-sílice (RAS)

La reacción álcali-sílice genera un gel que absorbe el agua presente en la mezcla, que induce presión, expansión y finalmente termina por fisurar el agregado y la pasta. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

La reacción puede ser representada de forma simplificada como sigue:



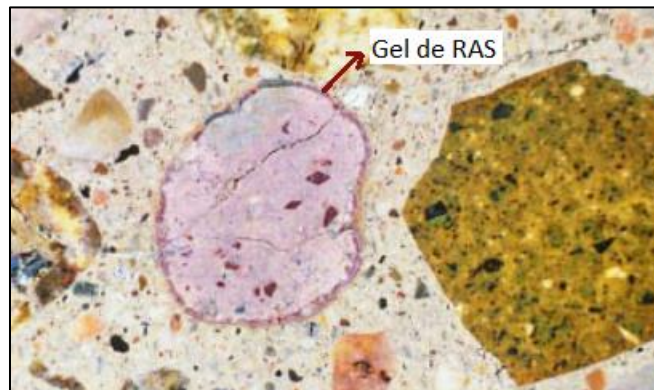
Los agregados que son objeto de esta reacción son aquellos que están compuestos por minerales silíceos. Es de resaltar que esta reacción será más rápida entre más desordenada sea la estructura del mineral. Entonces, el ataque será superficial en caso de que la sílice esté bien cristalizada o sea relativamente densa (Romero Buitrago, 2010)

Tres condiciones deben de presentarse para que pueda ocurrir la RAS:

1. Una forma reactiva de sílice en el agregado.
2. Una solución en el poro altamente alcalina (pH)
3. Humedad suficiente (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

Para determinar el daño en el concreto por reactividad álcali-sílice se puede realizar el ensayo de reactividad potencial a álcalis de combinaciones de cemento-agregado (método de la barra de mortero) según la ASTM C-227 o su correspondiente NTC 3828, el ensayo de reactividad potencial álcali-sílice de los agregados (método químico) de acuerdo con la NTC 175 y realizar un examen petrográfico de agregados para concreto como se describe en la ASTM C-295 o su correspondiente NTC 3773.

Figura 24. Vista de una sección pulida de un agregado reactivo con álcalis en el concreto. Obsérvese la reacción álcali-sílice que contorna el agregado reactivo y la formación de fisuras.



Fuente: “Diseño y control de mezclas de concreto” (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

A continuación, se presentan los minerales y rocas que son reactivas con los álcalis del cemento.

Tabla 10. Minerales reactivos con los álcalis del cemento.

MINERALES	
Opalo	Cuarzo vitrificado (Criptocristalino, microcristalino)
Tridimita	Cuarzo de grano grueso (Intensamente fracturado, granulado y deformado con incrustaciones submicroscópicas, de las que la illita es una de las más corrientes)
Calcedonia	Sílice volcánica cristalizada (Intermedia y básica)
Cristobalita	Cuarzo jaspeado

Fuente: (Romero Buitrago, 2010)

Tabla 11. Rocas potencialmente reactivas con los álcalis del cemento.

ROCAS	
ROCAS IGNEAS	
Granodiorita	Granitos (Más del 30% de cuarzo deformado, caracterizado por un ángulo de extinción ondulante de 25° o más)
Charnockitas	Piedra Pómez
Riolitas	Andesitas (Sílice o sílice intermedia, rica en cristales volcánicos; cristales devitrificados, trimidita)
Dacitas	Latitas
Perlitas	Obsidianas
Toba volcánica	Basalto (Calcedonia, cristobalita, palagonita, vidrio volcánico básico)
ROCAS METAMÓRFICAS	
Esquistos	Gneis (Más del 3% de cuarzo deformado, caracterizado por un ángulo de extinción ondulante de 25° o más)
Filitas	Cuarcitas (Cuarzo deformado caracterizado por un ángulo de extinción ondulante de 25° o más; 5% o más de sílice)
Argilitas	Corneanas (Cuarzo deformado caracterizado por un ángulo de extinción ondulante de 25° o más; cuarzo microcristalino a criptocristalino)
ROCAS SEDIMENTARIAS	
Pizarras	Areniscas (Cuarzo deformado caracterizado por un ángulo de extinción ondulante de 25° ó más; 5 % o más de sílice; ópalo)
Sílice (Cuarzo criptocristalino; calcedonia; ópalo)	Grauwacas (Cuarzo deformado caracterizado por un ángulo de extinción ondulante de 25° ó más; cuarzo microcristalino a criptocristalino)
Sílex	Limos (Cuarzo deformado caracterizado por un ángulo de extinción ondulante de 25° ó más; cuarzo microcristalino a criptocristalino)
Diatomita (Ópalo; cuarzo criptocristalino)	Tillitas (Cuarzo deformado caracterizado por un ángulo de extinción ondulante de 25° ó más; cuarzo microcristalino a criptocristalino)
Dolomías arcillosas cálcicas	Calcita arcillosa dolomítica con cuarzo
Calizas arcillosas dolomíticas (Dolomita; filosilicatos expuestos por dedolomitización)	

Fuente: (Romero Buitrago, 2010)

Otra sustancia potencialmente reactiva con los álcalis del cemento es el vidrio sintético (Gel de sílice)

b) Reacción álcali-carbonato (RAC)

La reacción álcali-carbonato es poco común, se presenta en agregados calcáreos de grano fino con presencia de arcilla y en aquellos que contienen dolomita. Generalmente este proceso se genera cuando el concreto se encuentra en una atmósfera húmeda. Se considera que la expansión está relacionada con la transformación de la dolomita en calcita y brucita, lo que genera el gel que propicia

la presión y rompimiento del agregado y el concreto debido al crecimiento de los cristales.

El proceso de dedolomitización del carbonato, que corresponde a la disolución del magnesio del mineral dolomita, se da en las rocas carbonatadas con dolomita, en la presencia del Sodio y el Potasio del cemento, lo que deja expuestos minerales de arcilla que se encuentran en las dolomitas, que al absorber el agua presente en el poro, genera presiones que pueden fisurar el concreto (Romero Buitrago, 2010).

Las siguientes características favorecen la reacción álcali-carbonato:

- Contenido de arcilla, en el rango del 5% al 25%.
- Relación entre calcita y dolomita de aproximadamente 1:1.
- Aumento en el volumen de la dolomita.
- Cristales dolomíticos discontinuos de pequeño tamaño dispersos en matriz de arcilla.

Para identificar los daños por reacción álcali-carbonato, se puede realizar un examen petrográfico según la ASTM C-295 o su correspondiente NTC 3773, el método del cilindro de roca según la ASTM C-586 ó el ensayo del prisma del concreto según la ASTM C-1105 (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

c) Reacción álcali-silicato (RASI)

Esta reacción se puede presentar en conjunto con la reacción álcali-silicato, y se diferencia de esta en que genera una reacción más lenta y un gel en pequeña cantidad. Se considera que esta reacción se debe a algunos minerales de rocas arcillosas y filosilicatos como las grauwacka, filitas y argilitas. La reacción entre los álcalis el hidróxido generado, desalojan un mineral similar a las vemiculitas presente en las capas de exfoliación, que al ser liberado, absorbe agua y se expande generando fisuración (Romero Buitrago, 2010).

- ***Epitaxia.***

Esta es una reacción química que favorece a los agregados, que mejora la adherencia entre algunos agregados calizos y la pasta de cemento con el paso del tiempo.

7.2.2. Propiedades físicas

- **Granulometría**

La granulometría corresponde a la distribución de los tamaños de las partículas que forman una masa de agregado. Para realizar el análisis granulométrico de una muestra se hace pasar el agregado a través de una sucesión de tamices de acuerdo con lo descrito en la NTC 77 (Rivera G. , 2013).

Figura 25. *Varios tamaños de partículas que se encuentran en los agregados para uso en concreto.*



Fuente: (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Para poder interpretar de forma adecuada la granulometría de un agregado, se grafican los resultados en la denominada curva granulométrica, en la cual se representa el porcentaje que pasa en el eje de las ordenadas y la abertura de los tamices en el eje de las abscisas en escala logarítmica (Gutiérrez de Lopez, 2003).

Existen diferentes razones por las cuales se especifican los límites granulométricos que debe tener un agregado empleado en concreto, ya que esta característica afecta las proporciones de los agregados, la cantidad de agua y cemento, la trabajabilidad, la economía, la porosidad y la durabilidad del concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). Un material bien gradado producirá resultados satisfactorios en las propiedades del concreto fresco (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003).

Según la NTC 174 se recomienda que el agregado fino y grueso cumpla con los siguientes límites granulométricos.

Tabla 12. Límites para el análisis granulométrico del agregado fino.

Tamiz NTC 32 (ASTM E 11)	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 μm	25 a 60
300 μm	10 a 30
150 μm	2 a 10

Fuente: NTC 174

Tabla 13. Requisitos de gradación para agregado grueso.

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

Fuente: NTC 174

- **Módulo de finura**

El módulo de finura se determina a partir de lo descrito en la NTC 77 y se define como un factor que permite establecer que tan fino o grueso es un material (Rivera G. , 2013). Este se determina como la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados de los tamices: No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, 3/8", 3/4" 1 1/2" y los siguientes tamices en relación de 1 a 2, dividido en 100.

La NTC 174 establece que los módulos de finura de los agregados empleados en concreto no deben ser menores de 2,3 ni mayores a 3,1.

- **Tamaño máximo**

El tamaño máximo del agregado hace referencia a la abertura que permite el paso del 100% del material (Gutiérrez de Lopez, 2003).

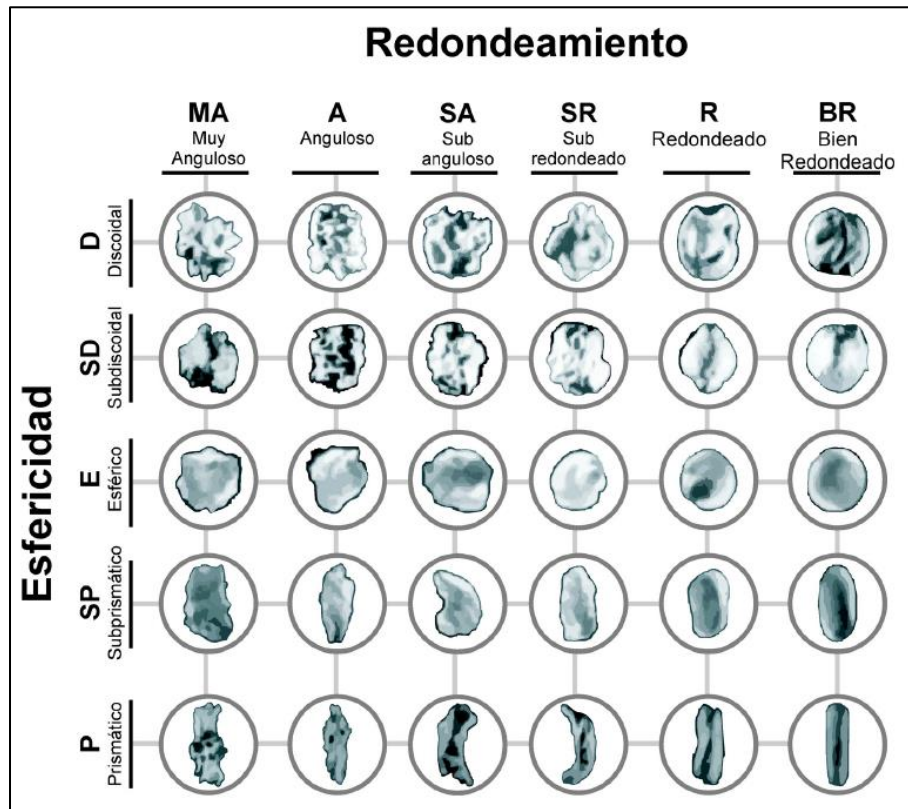
El tamaño máximo del agregado afecta principalmente la economía del concreto, ya que un agregado grueso con tamaño máximo mayor necesita más cantidad de agua y cemento en comparación con tamaños máximos menores, al aumentar el área superficial. El tamaño máximo del agregado influye directamente en la resistencia del concreto; y de acuerdo con investigaciones realizadas, se ha establecidos que entre menor es el tamaño máximo, menor será la resistencia, esto para gravas de

(3", 1 ½", ¾" y 3/8"). En cuanto al tamaños máximos iguales a 4,75 mm (No 4) no ocurre lo mismo (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003).

- **Forma**

La forma de las partículas de los agregados se define en función de su redondez y de su esfericidad. En términos de redondez las partículas pueden ser angulares o redondeadas, mientras que su esfericidad las clasifica en esféricas, prismáticas, subprismáticas, subdiscoidales y discoidales.

Figura 26. Tabla comparativa para la caracterización del grano de redondez y esfericidad que presenta un grano de arena



Fuente: Documento "Interpretando ambiente sedimentarios: Taller de sedimentología con arenas como actividad didáctica de Ciencias de la tierra" (Corbí & Martínez, 2015).

La forma del agregado está relacionada con las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, principalmente en aspectos de trabajabilidad y resistencia.

Las partículas angulares aumentan los vacíos entre partículas y requieren mayor cantidad de agua para mejorar la trabajabilidad del concreto, en comparación con los agregados lisos, redondeados y compactos. Sin embargo, formas angulares mejoran la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado, por lo cual se

mejora sustancialmente la resistencia flexión y a compresión (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Es importante mencionar que las partículas planas y alargadas generan concretos de mala calidad, ya que son frágiles y se pueden partir fácilmente durante la fabricación del concreto (Quiroz, Salamanca, & Antezana, 2006). En la norma NTC 385 se define una partícula alargada como aquella cuya relación longitud y ancho (l/b) es mayor a 1,5 y una partícula plana como aquella cuya relación espesor y ancho (d/b) es menor a 0,5. En algunas especificaciones se establece que el porcentaje máximo de partículas planas y alargadas en agregado grueso debe estar entre 10% y 15%.

- **Textura**

La textura es una característica del agregado que depende directamente de la roca madre, y puede ser lisa, pulida ó áspera (Gutiérrez de Lopez, 2003). Esta propiedad influye directamente en la calidad del concreto fresco y en la resistencia a la compresión y a la flexotracción del concreto, siendo mayor su influencia en esta última (Quiroz, Salamanca, & Antezana, 2006).

Una rugosidad mayor representa una mayor superficie de contacto con la pasta de cemento, por lo cual se requiere más pasta de cemento para lograr una buena trabajabilidad. Sin embargo, la rugosidad genera una mejor adherencia del agregado con la pasta y por lo tanto mejora la resistencia, caso contrario a lo que ocurre con una superficie lisa (Quiroz, Salamanca, & Antezana, 2006).

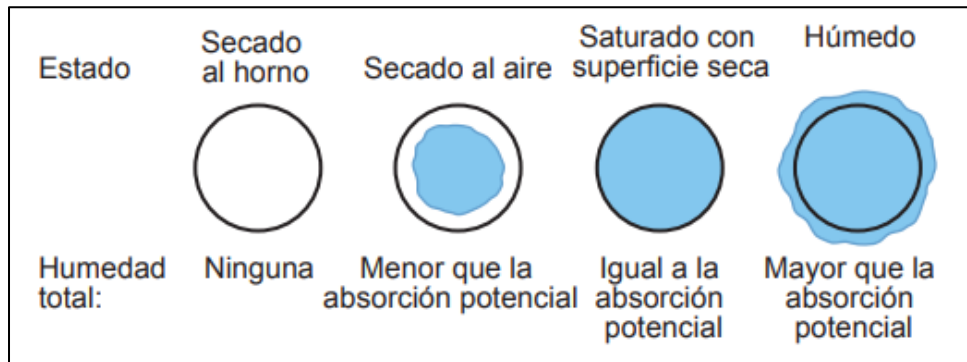
- **Porosidad**

La porosidad es una propiedad de los agregados que al ser mayor, aumenta la fuerza de adhesión, razón por la cual los agregados gruesos que tengan una porosidad baja, tendrán una mayor densidad y resistencia al desgaste, pero contarán con una menor adherencia (Romero Buitrago, 2010).

- **Absorción**

La absorción se define como la cantidad de agua que es necesaria para lograr saturar los agregados, que se expresa en relación con la masa de los materiales en estado seco (Rivera G. , 2013). A continuación, se observan las diferentes condiciones de humedad en las que se puede encontrar el agregado.

Figura 27. Condiciones de humedad de los agregados.



Fuente: (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

De acuerdo con las condiciones de humedad, los agregados empleados en concreto pueden aportar o quitar agua a la mezcla, ya que el agua libre que queda luego de la saturación del agregado, es la que reacciona con el cemento. Por lo tanto, si la humedad del agregado es mayor que su absorción, el agregado tiene agua libre y aporta a la mezcla (Rivera G. , 2013).

La absorción de los agregados finos y gruesos se determina a partir de las normas NTC 237 y NTC 176 respectivamente. Según Quiroz y Salamanca, 2006 se puede considerar que un agregado grueso es de buena calidad si presenta una absorción menor a 3% y en el caso de los agregados finos menor a 5%.

Una absorción baja junto con una forma adecuada (partículas aproximadamente redondas), generan una manejabilidad adecuada del concreto fresco. Por otro lado, la absorción del agregado está directamente relacionada con la alteración del mismo y la durabilidad de estructuras, haciéndolos más resistentes ante procesos de congelamiento o deshielo (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003).

- **Densidad**

La densidad se define como la relación entre la masa y el volumen de una masa determinada. Dependiendo de las condiciones de humedad de los agregados, existen diferentes tipos de densidad: absoluta, nominal o aparente. Para el diseño de mezclas de concreto se emplea la densidad aparente que corresponde a la relación entre el peso seco de las partículas y su volumen incluyendo los poros saturables y no saturables. El uso de esta densidad en el diseño de mezclas se debe a que los poros interiores del agregado ocupan un volumen dentro de la masa de concreto y el agua que se encuentra presente en los poros saturables no forma parte del agua de mezclado (Gutiérrez de Lopez, 2003).

Para determinar la densidad aparente de los agregados finos se emplea la NTC 237 y para los gruesos la NTC 176. Generalmente el valor de la densidad de los agregados varía entre $2,3 \text{ g/cm}^3$ y $2,8 \text{ g/cm}^3$.

Según Chan J., et al. una densidad buena ($\geq 2,25$), produce concretos con más densos que son más resistentes a la compresión.

- ***Resistencia al fuego***

La resistencia al fuego que presenta el concreto depende en cierta parte de la composición de los agregados empleados para su elaboración. De forma general los agregados ligeros manufacturados y algunos naturales son más resistentes al fuego que aquellos de peso normal, lo que está relacionado con sus propiedades aislantes y su estabilidad frente a altas temperaturas (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Los concretos que contienen agregado grueso calcáreo tienen un comportamiento mejor, bajo la exposición al fuego, que los concretos que contienen cuarzo o agregados silíceos, tales como los granitos y cuarcita. A aproximadamente 590°C el cuarzo se expande $0,85\%$, causando una expansión perjudicial. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

- ***Resistencia a ácidos y otras sustancias corrosivas***

El concreto de cemento portland puede ser atacado por soluciones ácidas que se desintegran lenta o rápidamente dependiendo del tipo y concentración del ácido. Aunque los ácidos atacan compuestos de calcio del cemento, ciertos agregados como los silíceos no se ven afectados tan fácilmente.

Los agregados de tipo calcáreo generalmente reaccionan con los ácidos, no obstante, ante la presencia de ácidos suaves, el ácido ataca la superficie de forma uniforme, previniendo la pérdida de partículas de agregados de la superficie, lo que resulta beneficioso. Los agregados silíceos se deben evitar en caso de que el concreto esté expuesto a soluciones fuertes de hidróxido de sodio, ya que estas atacan este tipo de agregados (Kosmatka et al., 2004).

7.2.3. Propiedades mecánicas

- **Resistencia al desgaste**

De forma general, la resistencia al desgaste es un punto de referencia para determinar la calidad del agregado, por lo cual esta propiedad es fundamental en agregados que serán sometidos a altas cargas como en pavimentos y pisos de servicio pesado (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

En cuanto al agregado fino, se considera que las arenas de río presentan características más favorables debido a que están compuestas por su mayoría de cuarzo. En cuanto a las gravas, se evalúa la resistencia al desgaste o abrasión mediante el ensayo en la máquina, de acuerdo a lo dispuesto en la NTC 98 y la NTC 93, según el caso (Quiroz, Salamanca, & Antezana, 2006).

Las especificaciones indican que el límite aceptable de porcentaje de desgaste es máximo de 40% (Rivera G. , 2013).

- **Dureza**

Se refiere a la resistencia del agregado ante el roce con otras partículas y el desgaste diario. Esta se puede determinar a partir de la NTC 98 ó NTC 93 (Gutiérrez de Lopez, 2003).

- **Sanidad**

La sanidad de los agregados se refiere a su capacidad de soportar los cambios en el ambiente como el calentamiento, enfriamiento, humedecimiento, secado, congelamiento y deshielo. Esta capacidad depende primordialmente de algunos aspectos como la procedencia del agregado, su granulometría, forma, textura y porosidad (Gutiérrez de Lopez, 2003).

En la NTC 126 se expone un método de ensayo para determinar la sanidad de los agregados. En el concreto las especificaciones de la NTC 174, indican que se deben realizar 5 ciclos de los descritos en el ensayo y los porcentajes límites de pérdida son:

Agregado fino → Sulfato de magnesio → Pérdida máxima del 15%
Sulfato de sodio → Pérdida máxima del 10%

Agregado grueso → Sulfato de magnesio → Pérdida máxima del 18%

Sulfato de sodio → Pérdida máxima del 12%

7.2.4. Presencia de contaminantes y sustancias perjudiciales

Dentro de las sustancias que son poco deseables en el concreto se encuentran las impurezas orgánicas, limo, arcilla, esquisto, carbón mineral, óxido de hierro, lignito y partículas ligeras y blandas. De igual forma, algunas rocas y minerales como el chert, el cuarzo deformado y calizas dolomíticas que son reactivas con los álcalis. Otros minerales como yeso y anhidrita pueden propiciar ataque de sulfatos. De igual forma es importante verificar la presencia de agregados como los esquistos que pueden causar erupciones relacionadas con el hinchamiento o congelamiento del agua absorbida (Kosmatka et al.,2004).

- ***Impurezas orgánicas***

De forma general la materia orgánica corresponde a los productos de la descomposición de la materia vegetal, en especial ácido tónico y sus derivados. Su forma común es el humus, las margas orgánicas y las turbas. Las impurezas orgánicas pueden interferir con las reacciones de hidratación, retrasando el fraguado y el endurecimiento del concreto. Pueden causar deterioro, disminuyendo la durabilidad del concreto debido a la descomposición de las impurezas. Además pueden disminuir la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento, reduciendo la resistencia del concreto (Rivera G. , 2013).

Para determinar el contenido de impurezas orgánicas en los agregados para concreto se realiza el ensayo según lo descrito en la NTC 127, y se compara el color estándar de la solución o el vidrio, con el color de la solución preparada. Si el color obtenido es más oscuro que el de referencia (solución de color estándar o placa orgánica No. 3), se considera que el material presenta impurezas orgánicas.

- ***Material fino***

Material más fino que 75µm (tamiz No. 200) como la arcilla y el limo, pueden cubrir la superficie de las partículas de agregados gruesos, generando una disminución en la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento, lo que reduce la resistencia y durabilidad del concreto. De igual forma, cantidades excesivas de algunos tipos de limo o arcilla aumentan la demanda de agua de forma representativa (Kosmatka et al.,2004).

Para determinar la cantidad de material fino se sigue el procedimiento descrito en la NTC 78. En la NTC 174 se establecen los límites de contenido de material fino en agregados para concreto como se observa a continuación (Rivera G. , 2013):

Agregado fino → Para concreto sujeto a desgaste → 3%

Para cualquier otro caso → 5%

Agregado grueso → Para material exento de arcilla o pizarra → 1,5%

Para cualquier otro caso → 1,0%

- **Partículas livianas**

Las partículas livianas como el carbón mineral o el lignito y otros materiales de baja densidad tales como la madera o materiales fibrosos, pueden afectar la durabilidad y resistencia del concreto. En caso de que estos materiales se encuentren en la superficie, se puede desintegrar, causar erupciones y manchas generando mala apariencia en el concreto. “Otras partículas como los cherts son potencialmente dañinos en el agregado grueso” (Kosmatka et al. 2004).

Para determinar la cantidad de partículas livianas en el agregado, se realiza el procedimiento descrito en la NTC 130. Los límites para el contenido de partículas livianas establecidos en la NTC 174 son:

Tabla 14. Límites de contenido de partículas livianas en agregado para concreto.

AGREGADO FINO		
Carbón o lignito	Donde la apariencia superficial del concreto sea de importancia	0,5%
	Todos los demás concretos	1,0%
AGREGADO GRUESO		
Chert	Varía según tipo de construcción y región pluviométrica	3,0% – 8,0%
Carbón o lignito	Varía según tipo de construcción y región pluviométrica	0,5% - 1,0%

Fuente: Adaptado de la NTC 174

- **Partículas deleznales**

Los terrones de arcilla y partículas deleznales “pueden absorber parte del agua de mezcla, causar erupciones en el concreto endurecido y afectar la durabilidad y la resistencia al desgaste. También se pueden fracturar durante el mezclado, y como consecuencia, aumentar la demanda de agua” (Kosmatka et al. 2004).

La cantidad de partículas deleznales y terrones de arcilla se pueden determinar según lo descrito en la NTC 589 y los límites de contenido en agregados para concreto se establecen en la NTC 174, así:

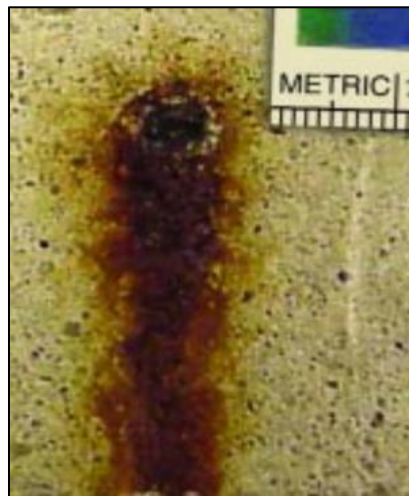
Agregado fino → Máximo 3%

Agregado grueso → Varía entre 2,0% y 10,0% según tipo de construcción y región pluviométrica.

- **Óxidos y sulfuro de hierro**

Los óxidos y sulfuros de hierro que pueden estar presentes en los agregados causan manchas antiestéticas sobre las superficies del concreto que están expuestas. Se recomienda que los agregados cumplan con lo dispuesto en la NTC 4045.

Figura 28. Mancha de óxido de hierro provocada por impurezas en el agregado.



Fuente: (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

8. AGREGADOS PARA FILTROS EN PLANTAS DE PURIFICACIÓN DE AGUA.

8.1. FILTRACIÓN DEL AGUA

La filtración es una operación que consiste en hacer pasar el agua por un lecho poroso con el objetivo de separar las partículas y microorganismos objetables que no han quedado retenidos durante la coagulación y la sedimentación. (Perez, 1981).

La filtración del agua se puede efectuar con baja carga superficial (filtros lentos) o con alta carga superficial (filtros rápidos), en medios porosos como las pastas arcillosas y el papel filtro o en medios granulares como la arena, antracita, granate, o combinados. Esta operación puede realizarse con flujo ascendente (de abajo hacia arriba), descendente (de arriba hacia abajo) o mixto (Parte ascendente y parte descendente). Finalmente, el filtro puede trabajar a presión o por gravedad, de acuerdo a la magnitud de la carga hidráulica que se encuentre en el lecho filtrante. (Arboleda, 2000)

En plantas de tratamiento de agua potable generalmente se han empleado filtros de arena o de arena antracita. Actualmente son considerablemente utilizados los filtros rápidos por gravedad, de flujo descendente y de lecho doble de arena y antracita (Perez, 1981), como se presenta a continuación:

Tabla 15. Clasificación de los filtros

SEGÚN LA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN	SEGÚN EL MEDIO FILTRANTE	SEGÚN EL SENTIDO DEL FLUJO	SEGÚN LA CARGA SOBRE EL LECHO
Lentos 2 – 10 m ³ / m ² · d	Arena	Ascendentes Descendentes	Por gravedad
Rápidos 120 – 360 m ³ / m ² · d	<u>Lecho simple:</u> 1. Arena 2. Antracita	Ascendentes Descendentes	Por gravedad Por presión
Rápidos 240 – 480 m ³ / m ² · d	<u>Lecho mixto:</u> a. Lecho doble de arena y antracita b. Lecho triple de arena, antracita y Granate	Ascendentes Descendentes	Por gravedad Por presión

Fuente: Libro "Teoría y práctica de la purificación del agua" (Arboleda, 2000)

De acuerdo al tipo de operaciones y procesos que conforman las plantas de tratamiento de agua, es posible clasificarlas en plantas de filtración lenta y en plantas de filtración rápida. Sin embargo, "se pueden clasificar según la tecnología

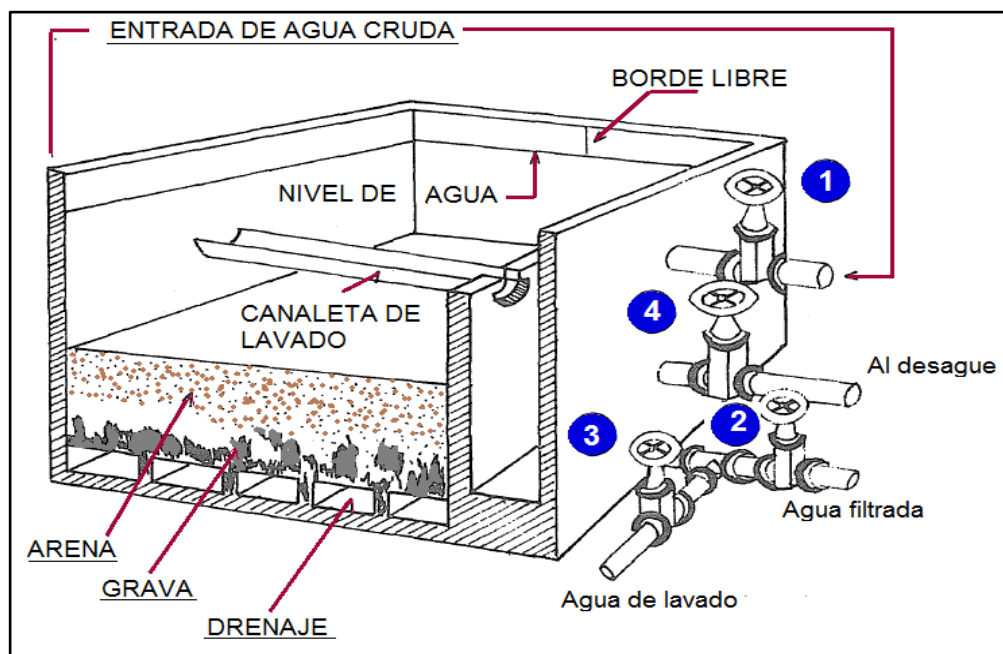
usada en el proyecto, en plantas convencionales antiguas, en plantas convencionales de tecnología apropiada, en y en plantas de tecnología importada o de patente” (De Vargas, 2004).

8.2. FILTRACIÓN RÁPIDA

En la filtración rápida, los filtros operan altas velocidades, que pueden variar entre 80 y 300 m³/m².d. Estas velocidades dependen del medio filtrante, de las características del agua y de los recursos que se tengan disponibles para sostener y operar la unidad de filtración (De Vargas, 2004).

Los filtros rápidos convencionales constan de un tanque rectangular de concreto de 3.5 a 5 m de profundidad total. En el tanque se instala un lecho de arena y grava sobre un sistema adecuado de drenaje. En la parte superior del tanque pasa un flujo con una profundidad aproximada de 0.50 a 2.00 m, a los drenes del fondo atravesando el medio filtrante. Luego de unas horas de la operación, el filtro se obstruye; por lo cual es necesario lavarlo cambiando el sentido del flujo. Para ello, se inyecta agua a presión en los drenes y posteriormente se recoge en las canaletas de lavado ubicadas sobre la superficie de la arena como se muestra en la siguiente figura. El tiempo de operación de lavado varía de 5 a 15 minutos, luego de la cual el filtro vuelve a su operación normal (Arboleda, 2000).

Figura 29. Filtro rápido convencional



Fuente: Libro "Teoría y práctica de la purificación del agua" (Arboleda, 2000)

El filtro rápido convencional se encuentra conformado por un sistema de cuatro flujos: “1. Un flujo de entrada del agua decantada al filtro, 2. Un flujo de salida del agua ya filtrada, 3. Un flujo de entrada del agua de lavado al filtro para hacer la limpieza del medio filtrante, 4. Un flujo de desagüe del agua sucia proveniente del lavado de la unidad y finalmente 5. Un flujo de relavado para eliminar el primer filtrado cuya calidad es por lo general mala.” (Arboleda, 2000)

8.2.1. Medio filtrante

En plantas de tratamiento de aguas, el medio filtrante está formado por materiales granulares como la arena, antracita y/o granate (Perez, 1981). Estos lechos filtrantes en ocasiones pueden ser homogéneos, los cuales se encuentran compuestos únicamente de arena o antracita, o pueden ser mixtos compuestos de arena y antracita. Se clasifican de acuerdo con la profundidad como: convencionales con profundidades (L) que varían de 0.6 m a 0.75 m, o profundos que pueden variar de 0.9 m a 2.40 m (Arboleda, 2000). Los espesores (E) y las profundidades (L) de los medios filtrantes descritos anteriormente se presentan en la tabla que se muestra a continuación:

Tabla 16. Medios filtrantes en filtros rápidos

	MEDIOS FILTRANTES					
	Homogéneos				Mixtos	
	Arena		Antracita		Arena	Antracita
	Convencionales	Profundos	Convencionales	Profundos		
E (mm)	0.45 – 0.55	0.9 – 1.20	0.6 – 0.8	1.0 – 1.80	0.45 – 0.55	0.9 – 1.4
L (m)	0.6 – 0.75	0.9 – 1.8	0.6 – 0.75	1.2 – 2.4	0.2 – 0.4	0.3 – 0.55

Fuente: Libro “Teoría y práctica de la purificación del agua” (Arboleda, 2000)

Las partículas del medio filtrante deben ser resistentes, con formas redondeadas y sin presencia de esquistos ni arcilla o materia orgánica, con el fin de que el lecho filtrante tenga una adecuada composición (RAS, 2000).

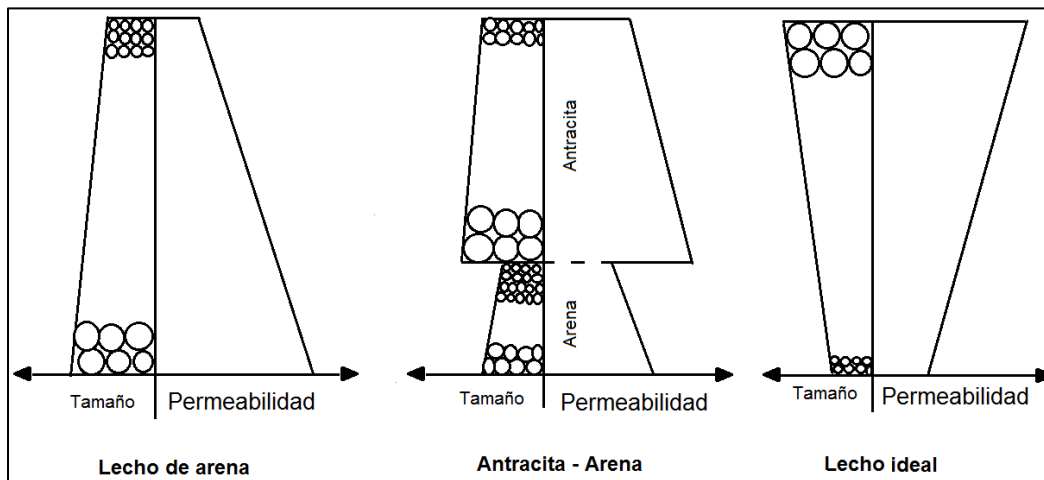
- **Características de los medios filtrantes**

Existe una característica fundamental en los medios de arena convencionales a tener en cuenta y se encuentra relacionada con la permeabilidad, debido a que, si la permeabilidad aumenta, la profundidad del filtro también lo hará. En esta situación los granos de arena más pequeños quedarán arriba y los más grandes en la parte de abajo, es decir que, mientras el floc penetra dentro del medio filtrante, este encontrará poros notablemente mayores por donde será más sencillo pasar. Por ello, se puede identificar fácilmente que, debido a una incorrecta estratificación, el

porcentaje de partículas de arena quedarán retenidos en la parte superior y por consiguiente será limitada la capacidad de almacenamiento de los flóculos.

De esta manera, una solución a este problema se basa en lograr que la permeabilidad del medio se reduzca con la profundidad, con el fin de que los flóculos penetren y encuentren el lecho más grueso en las capas superiores y el más fino en capas las inferiores. Sin embargo, empleando un único material granular no es posible, debido a que el flujo de lavado lo estratifica en sentido contrario. Para ello, se pensó en utilizar lechos con densidades diferentes con el fin de que el flujo se deposite en la parte superior de los granos finos, donde su densidad será mayor. En este sentido se podría utilizar un lecho de antracita y uno de arena, donde el primero (antracita) quedara encima del lecho de arena como se muestra en la figura (Arboleda, 2000).

Figura 30. Tipos de lechos filtrantes



Fuente: Libro "Teoría y práctica de la purificación del agua" (Arboleda, 2000)

➤ **Parámetros de los medios filtrantes**

En la filtración lenta y rápida existen algunos parámetros que deben cumplir los medios filtrantes como se describen a continuación:

Granulometría del material granular: La granulometría del medio define la uniformidad y tamaños de las partículas. Este último representa el porcentaje del 10% de peso de un material que pasa por un tamiz. Por su parte el coeficiente de uniformidad es la relación entre el tamaño de los granos del 60% y el tamaño de los granos del 10% de peso del material que pasa por tamices de una serie granulométrica. Según la teoría el coeficiente de uniformidad debería llamarse de

desuniformidad, ya que su valor aumenta mientras menos uniforme sea el material granular (De Vargas, 2004).

Atacabilidad: Algunos gases o agentes agresivos pueden atacar un material provocando que se degraden. Para ello se puede determinar la atacabilidad de estos agentes en el material, sumergiendo las partículas del medio filtrante en una solución de ácido sulfúrico al 5% durante un tiempo de 24 horas para posteriormente secar y pesar su masa. Para que el material sea aceptable luego del ensayo se recomienda que la reducción del peso sea menor del 2% (Degrémont, 1973).

Sin embargo, se puede evaluar la atacabilidad o solubilidad del material, sumergiendo las partículas en ácido clorhídrico al 40% durante 24 horas para luego secarla y pesarla. "Para ello la arena debe tener una solubilidad menor del 5%" (Arboleda, 2000). Los límites de la solubilidad en ácido son apropiados para garantizar la protección contra aquellos materiales o sustancias perjudiciales en el lecho filtrante, asimismo, sirve para proteger contra la solución del material filtrante durante la limpieza con ácido o con aguas ácidas (NTC 2572, 2010).

Geometría del lecho: La profundidad del lecho y la superficie filtrante son dos parámetros fundamentales en la operación de filtración. Se recomienda un mínimo espesor que deberá emplearse con el fin de alcanzar un filtrado satisfactorio. Por su parte la superficie filtrante depende del valor de diseño de la tasa o velocidad de filtración (Degrémont, 1973).

➤ **Tipos de medios filtrantes**

Arena

En los filtros rápidos, la arena debe estar formada por material silicio con una dureza de 7 según la escala de Moh. Debe tener un diámetro menor a 2 mm y un peso específico no inferior a 2. Es fundamental que la arena se encuentre limpia, es decir que esté exenta de materia orgánica, barro y el material laminar o micáceo que presente, no debe ser mayor al 1%.

Las arenas deben tener un coeficiente de uniformidad $C_u \leq 1.1$, con el fin de que las partículas presenten uniformidad. La pérdida por ignición de este material debe ser menor del 0.7% y la solubilidad del mismo en HCL al 40% durante un tiempo de 24 horas tendrá que ser menor del 5% (Arboleda, 2000).

Según la experiencia americana, la arena fina debe tener las siguientes características:

- El coeficiente de uniformidad varía entre 1.50 y 1.70

- La profundidad del lecho filtrante se encuentra entre 0.60 m y 0.75 m
- El tamaño efectivo debe estar entre 0.40 y 0.70, preferiblemente entre 0.45 y 0.55
- Nos mas del 1% del material tiene que ser mayor de 2 mm o menor a 0.3 mm

Según los diseñadores europeos los tamaños de las arenas suelen ser gruesos de 1.0 a 2.0 mm y los lechos profundos deben estar entre 0.90 m y 1.20 m, incluso hasta 1.8 m (Arboleda, 2000, pág. 443).

La forma de las partículas de arena (redondeadas o angulares) está relacionada con la porosidad de las mismas. En el caso de las arenas redondeadas, las porosidades pueden variar entre 42% y 45% y para las arenas angulares, las porosidades generalmente se encuentran entre 44% y 47%. Si bien, este último tipo de arena presenta mayores porosidades, por lo que producen una mayor pérdida de carga inicial y por lo tanto son más difíciles de lavar de una forma adecuada. No obstante, es preferible usar arenas de rio de formas redondeadas (Arboleda, 2000).

Según las recomendaciones proporcionadas por el RAS 2000, los lechos de arena fina, estándar o gruesa deben cumplir con las siguientes características:

Tabla 17. Características de la arena para filtros rápidos

	TAMAÑO EFECTIVO		COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD	
	MÍNIMO (mm)	MÁXIMO (mm)	MÍNIMO	MÁXIMO
Arena fina	0.35	0.45	1.35	1.70
Arena estándar	0.45	0.65		
Arena gruesa	0.65	0.85		

Fuente: Documento "Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: Sistema de potabilización" (RAS, 2000)

En filtros rápidos, se recomiendan lechos de arena fina (0.35 mm – 0.45 mm), siempre y cuando el pretratamiento sea poco satisfactorio, el sistema de lavado se diseñe solo para arena fina, cuando se requiera de grados de remoción altos y para operar en cortos periodos de filtración. Por su parte, cuando se utilicen lechos de arena gruesa (0.65 mm – 0.85 mm) se recomiendan que el pretratamiento sea satisfactorio, que no requieran grado de remociones altos y que el filtro este diseñando para tasas de lavado altas. (RAS, 2000)

La Norma Técnica Colombiana, presenta algunas especificaciones de medios filtrantes para cualquier tipo de filtración, que se encuentran relacionadas con el tamaño efectivo o eficaz de las partículas y el coeficiente de uniformidad de las mismas (Tabla 18).

Tabla 18. Especificaciones de lechos de arena

TIPO DE LECHO DE ARENA	TAMAÑO EFICAZ (mm)	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (mm)
Arena de sílice	0.35 – 0.65	≤ 1.7
Arena de alta densidad	0.18 – 0.60	≤ 2.2

Fuente: Documento “Norma Técnica Colombiana: Material filtrante granular” (NTC 2572, 2010)

La arena de sílice debe estar compuesta por granos densos y duros con un porcentaje del material silicio no menor que el 85% con el fin de que estas puedan resistir a la degradación durante su manipulación. Además, es importante que el material se encuentre libre de polvo, arcilla o materia orgánica. Por su parte, la arena de alta densidad consiste en granos densos y duros de granate, magnetita u otros minerales relacionados con estos metales que puedan resistir a la degradación durante su uso y que estén exentos de arcilla o material orgánica. (NTC 2572, 2010). Según la norma, existen algunas recomendaciones para los lechos de arena de sílice, de arena de alta densidad y antracitas relacionados con la gravedad específica y la solubilidad en ácido de los mismos (Tabla 19)

Tabla 19. Gravedad específica y solubilidad en ácido para los medios filtrantes

MEDIO FILTRANTE	CARACTERÍSTICAS	
	GRAVEDAD ESPECÍFICA	SOLUBILIDAD EN ACIDO (%)
Antracita	>1.4	<5
Arena de sílice	>2.5	<5
Arena de alta densidad	>3.8	<5

Fuente: Documento “Norma Técnica Colombiana: Material filtrante granular” (NTC 2572, 2010)

Antracita

La antracita en los filtros rápidos debe presentar una característica fundamental y es la durabilidad, ya que debe ser resistente a la abrasión que se produce por el lavado sin que se desintegre. Según la escala de Mohs, la dureza tiene que ser mayor o igual a 3 y su peso específico debe ser de aproximadamente 1.5 (Perez, 1981).

La antracita presenta porosidades que pueden variar entre el 56% y el 60%, sus tamaños efectivos pueden estar entre 0.05 y 1.4 mm y la solubilidad en HCL por 24 horas debe ser mayor al 2% y menor al 5% (Arboleda, 2000).

Grava

El lecho de grava debe estar ubicado sobre el sistema de drenaje siempre y cuando cumpla con el propósito de distribuir el agua de lavado y de utilizarse como soporte al medio filtrante de arena mientras se produce la operación de filtrado con el fin de evitar que la arena escape por los drenes (Arboleda, 2000).

Estas gravas, deben ser de un material duro y resistente a la abrasión. Asimismo, su superficie debe ser lisa y en su conjunto deben constituir un porcentaje de formas planas y alargadas mínimo (RAS, 2000).

Si el filtro posee un sistema de drenaje con aberturas mayores que las del medio filtrante, se recomienda emplear un sistema de mantos de gravilla de sostén para evitar que el medio bloquee o se introduzca en el sistema de drenaje y “para facilitar la distribución uniforme de retrolavado”.

En filtros de sistema convencional, se recomienda que los granos de cada manto se encuentren lo suficientemente uniformes en cuanto sea posible, con una relación entre el tamaño máximo y mínimo de la partículas no mayor que 2 y con “un tamaño mínimo de partícula del manto superior de gravilla fina 4 a 4.5 veces el tamaño efectivo del medio filtrante fino que se va a retener” (NTC 2572, 2010).

Para evitar el desplazamiento de las partículas de gravilla generados por los chorros de aire o de agua que surgen de los orificios del sistema de drenaje, se recomienda que la gravilla del manto de la base preferiblemente sea gruesa. Además, estas partículas deben tener un tamaño mínimo en la parte inferior del manto, dos veces mayor que el tamaño de las aberturas del drenaje (NTC 2572, 2010).

Existen dos tipos de gravilla filtrante, la primera se considera como gravilla de sílice y la segunda es llamada gravilla de alta densidad, estas se describen a continuación:

➤ **Gravilla filtrante de sílice**

Este tipo de gravilla debe estar compuesta por un agregado grueso con una cantidad alta de partículas redondeadas lo suficientemente resistentes y durables a la degradación durante su manipulación. Se recomienda que la gravilla de sílice tenga una gravedad específica para una superficie saturada seca no menor de 2.5, siempre y cuando no se especifique una gravedad específica mayor que permita satisfacer el diseño para el manto. Este material debe estar libre de la presencia de arcilla o impurezas orgánicas; además el peso de las partículas planas o alargadas no debe ser mayor al 2% y el peso de las partículas con superficies fracturadas no debe ser mayor que el 25% (NTC 2572, 2010).

➤ **Gravilla filtrante de alta densidad**

La gravilla de alta densidad está compuesta por agregados gruesos de granate, hematita magnetita o aquellos minerales que se encuentre relacionados con estos metales, con una cantidad prolongada de partículas redondeadas y resistentes a la degradación durante su manipulación. Este material debe tener un peso seco de partículas alargadas y planas con un porcentaje no mayor que el 2%, debe tener una gravedad específica mínimo de 3.8 y deben estar libre de acilla o materia orgánica. (NTC 2572, 2010)

8.3. FILTRACIÓN LENTA

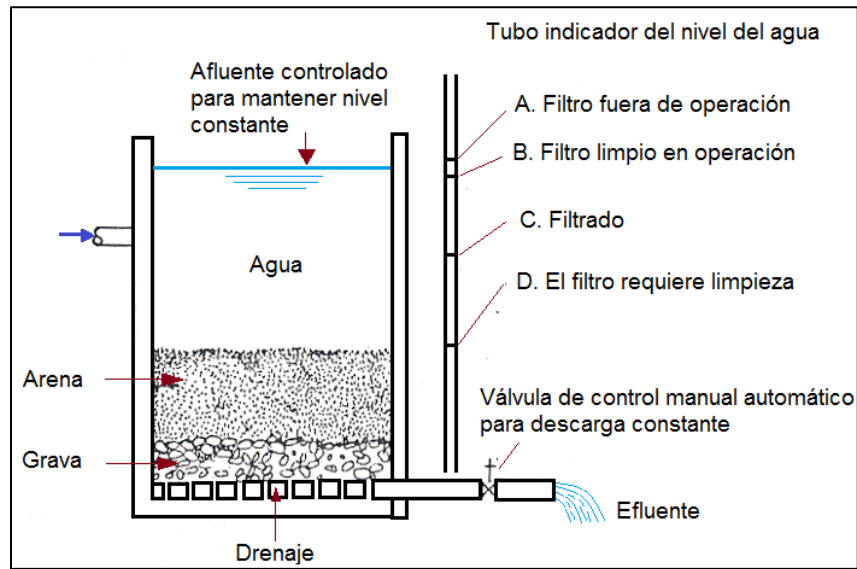
Un proceso de purificación del agua como “la filtración lenta consiste en hacer pasar agua a través del lecho poroso de un medio filtrante” con el fin de reducir los microorganismos como bacterias o virus, eliminar los sólidos suspendidos y mejorar la calidad del agua. (Dijk & Oomen, 1978)

En la filtración lenta o biológica, los filtros generalmente operan a tasas menores de $12 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, estos filtros son usados para eliminar la turbiedad del agua siempre y cuando los valores de turbiedad se encuentren entre 10 y 20 UNT (Unidades nefelométrías de turbiedad) (Arboleda, 2000).

Los filtros lentos poseen algunas características como tener un sistema sencillo, limpio y eficiente para el tratamiento del agua, su operación es de bajo costo y debido a su mantenimiento se considera como un sistema ideal para las zonas rurales y para pequeñas comunidades (Torres & Villanueva, 2014).

Los filtros lentos convencionales o filtros de flujo descendente están formados por una caja rectangular o circular compuesta por dos lechos, uno de arena fina con una profundidad de 0.90 m a 1.20 m sobre un lecho de grava gruesa con profundidades que pueden variar de 1.00 a 1.50 m. Este lecho de grava va ubicado sobre un sistema de drenes apropiado, como se muestra en la figura 29. (Arboleda, 2000).

Figura 31 Filtro lento de arena



Fuente: Libro "Acuapurificación" (Romero R, 1993)

8.3.1. Medio filtrante

En los filtros lentos, el medio filtrante debe estar formado por un material granular resistente, durable y limpio. Se recomienda que el lecho de arena esté exento de arcilla y materia orgánica. El contenido de carbonato y magnesio no debe ser mayor del 2% con el fin de evitar que en agua con contenidos de CO₂ prolongados, este permanezca atrapado para que produzca cavitación en el medio filtrante. Asimismo, se especifica que el tamaño efectivo, varíe de 0.35 mm a 0.55 mm, que el coeficiente de uniformidad se encuentre ente 2 y 4 y que la profundidad del lecho en arena sea del orden de 0.8 m a 1.0 m (RAS, 2000).

La grava se debe diseñar de manera similar como sucede en los filtros rápidos. Por su parte, el lecho fino o de arena que se coloca sobre la grava, debe tener un tamaño efectivo entre 0.15 mm y 0.30 mm y un coeficiente de uniformidad entre 1.5 y 2.5. Se pueden obtener bajas porosidades en relación con los filtros rápidos lavados con fluidificación de los granos, al no existir un lavado ascendente donde los granos finos y grueso se mezclan y no existe estratificación. (Arboleda, 2000)

Según el Ras 2000, se recomienda que el medio o capa de soporte este conformado por grava. Estas deben ser redondeadas y resistentes, exentas de arena, limo y materia orgánica. Deben tener un peso específico mayor de 2.5 y no debe perder su peso en más del 5% luego de sumergirla en ácido clorhídrico durante un tiempo de 24 horas. El espesor de la grava se debe diseñar de acuerdo a los tamaños de los granos de arena para seleccionar los tamaños de grava fina y las características

del sistema de drenaje para seleccionar los tamaños de grava gruesa. También se recomienda algunos rangos de parámetros como el tamaño efectivo y el espesor del medio filtrante como se muestra a continuación:

Tabla 20. Especificaciones de la grava soporte

CAPA	TAMAÑO DE LA GRAVA (mm)	ESPESOR DEL MEDIO (m)
1	9 - 10	0.10 – 0.15
2	2 - 9	0.05
3	1 – 1.5 (arena)	0.05

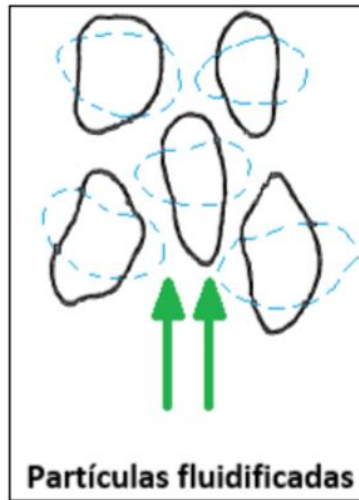
Fuente: Documento “Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: Sistema de potabilización” (RAS, 2000)

8.4. LAVADO DE MEDIOS FILTRANTES

Mientras se ejecuta la operación de filtrado, el lecho se encuentra limpio y el agua que se sedimenta es forzada a pasar por el filtro por efecto de la gravedad. Al combinarse estos mecanismos, el material que se encuentra suspendido se retiene en el medio filtrante hasta que se acomodan las partículas o se obstruyen los poros por donde pasa el flujo, generando que se incremente la pérdida de carga hasta obtener valores que requieren de una limpieza periódicamente. (Perez, 1981). Para ello se pueden emplear dos métodos: el primero consiste en lavar las capas superiores por separado para posteriormente trasladarlas de nuevo al filtro. Este método se emplea únicamente en filtros lentos, generando que se remuevan las partículas no floculantes la cuales penetran poco dentro del lecho (Arboleda, 2000).

Un segundo método se realiza invirtiendo el sentido del flujo, es decir que el agua haga un recorrido de abajo hacia arriba logrando de esta manera que los granos del medio filtrante se fluidifiquen (figura 32) para que estos queden suspendidos por la corriente de flujo ascendente a una distancia entre sí que genera que rocen con el fin de eliminar el material que encuentra retenido entre ellos. (Perez, 1981).

Figura 32. Etapa de fluidización en el lavado con flujo ascendente de un filtro



Fuente: Libro "Teoría y práctica de la purificación del agua" (Arboleda, 2000, pág. 412)

Una vez finalizado el primer lavado que se le realiza al filtro, los granos tienen a sedimentarse, permitiendo que el lecho se estratifique de modo que las partículas más pequeñas queden en la parte superior y por su parte las partículas más grandes queden en la parte de abajo. Al retomar la operación de filtración (flujo descendente), el medio filtrante no se ejecuta de la mejor forma, debido a que en la parte superior donde existen menos espacios de vacíos, quedan retenidas las partículas suspendidas y por lo tanto es "menor la capacidad de almacenamiento de sólidos". Una solución a este problema, es empleando lechos filtrantes múltiples, compuesta de antracita, ubicada en la parte superior de la arena, debido a que su porosidad y tamaño efectivo son mayores, permitiendo de esta manera, que el floc pueda penetrarse a gran profundidad de modo que el filtro no se sitúe en la parte superior (Perez, 1981).

9. NORMATIVA Y ESPECIFICACIONES EMPLEADAS

9.1. Normativa para concretos

Para determinar las aptitudes de los agregados analizados en este trabajo para ser empleados como agregados para concreto, se realizan los ensayos listados a continuación, comparando los resultados obtenidos con las especificaciones descritas en la Norma Técnica Colombiana 174 "Concretos. Especificaciones de los

agregados para concreto” y con identificación de los minerales y sustancias perjudiciales en el concreto.

Tabla 21. Lista de ensayos de los agregados para concreto realizados en el marco de la investigación.

NORMA	NOMBRE
NTC 3674	Ingeniería civil y arquitectura. Práctica para la reducción del tamaño de las muestras de agregados, tomadas en campo, para la realización de ensayos.
NTC 78	Ingeniería civil y arquitectura. Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75µm en agregados minerales.
NTC 77	Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.
NTC 237	Ingeniería civil y arquitectura. Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino.
NTC 176	Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso.
NTC 98	Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de agregados gruesos menor de 37,5mm, utilizando la máquina de los ángeles.
NTC 589	Concreto. Método de ensayo para determinar el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados.
NTC 126	Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la solidez (sanidad) de agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.
NTC 127	Concretos. Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto.
NTC 6043	Método de ensayo para determinar el porcentaje de partículas planas, partículas alargadas o partículas planas y alargadas en agregado grueso.

9.2. Normativa para filtros

Con el propósito de establecer y determinar las propiedades físicas de los agregados para ser empleados en filtros en plantas de tratamiento de agua, se realizan los ensayos de granulometría del lecho filtrante, peso específico, porosidad y solubilidad en ácido clorhídrico de los mismos basados en la metodología de Autor Jorge Arboleda Valencia descritas en su libro “Teoría y práctica de la purificación del agua: Teoría de la filtración del agua” y en la NTC 2572 “Material filtrante granular”.

Los resultados obtenidos de estos ensayos se comparan con las especificaciones establecidas en el RAS 2000 “Reglamento Técnico del Sector de agua potable y saneamiento básico: Sistemas de potabilización”, en la NTC 2572 y en las especificaciones establecidos por el autor mencionado.

Tabla 22. Lista de ensayos de los agregados para filtros realizados en el marco de la investigación.

NORMA	DESCRIPCIÓN
Granulometría del lecho filtrante	<p>La determinación de la granulometría del lecho filtrante se realiza mediante la metodología descrita en la NTC 77 en la cual se establece el procedimiento para realizar el análisis por tamizado de los agregados y basados en la metodología descrita por el autor Jorge Arboleda Valencia. Para ello, se debe tomar la muestra de agregado inalterado drenándolo completamente. Posteriormente se coloca la muestra en un recipiente para secarla a 100 °C durante un intervalo de tiempo entre 12 y 24 horas hasta quitarle toda la humedad al medio.</p> <p>Una vez seca la muestra, se mezcla varias veces y se extrae una porción de 200 a 500 gramos, la cual se pesa y se coloca en una serie de tamices seleccionados. (Se puede realizar mediante la serie americana escogiente los tamices desde No. 10 hasta No. 50 o se puede realizar mediante la serie de Tyler desde el tamiz No 8 hasta el No 48).</p> <p>Luego, se coloca la muestra en los tamices sometiéndola a vibración intensa, ya sea por sistema manual o mecánico para que el material se clasifique en ellos según su tamaño; finalmente se extrae el contenido retenido en cada uno y se pesa. En la norma NTC 2572 se realiza un procedimiento similar.</p>
Peso específico	<p>Teniendo en cuenta la Norma Técnica Colombiana 237 y 176, es posible determinar la densidad del agregado fino y grueso. Asimismo, esta densidad se puede determinar mediante la metodología del autor Jorge Arboleda Valencia, en la que se recomienda que se seque la muestra del medio filtrante durante 24 horas a 103 °C y se pese cuidadosamente una muestra de 150 gramos colocándola en un vaso de precipitado de 400 ml. Posteriormente se añaden 100 ml de agua destilada para hervirla durante 5 minutos a fin de expulsar el aire.</p> <p>Luego se pesa un matraz desecado de 250 ml, se enfría y lleva la muestra a ese matraz y se completa con agua destilada hasta la marca. Finalmente se debe pesar el agua más el matraz más la muestra de lecho filtrante. El procedimiento descrito en las NTC mencionada es más complejo, para ello se recomienda seguir detalladamente la metodología mencionada en la norma.</p>
Porosidad	<p>Basados en el procedimiento del método de Baylis, presentado por el autor Jorge Arboleda Valencia, el cual no tiene en cuenta la profundidad real del lecho y por consecuencia no representa la porosidad que existe en el filtro. Se recomienda que la muestra de agregado se coloque en un tubo de plástico o vidrio de 2” de diámetro como para que alcance una</p>

	altura de 60 cm con una masa aproximada de 1000 gramos de arena. Posteriormente se debe secar la muestra y se determina su masa. Luego se lava el medio filtrante con flujo ascendente con el fin de producir una expansión del 50%, se deja asentar lentamente la muestra, se marca el tubo en el borde superior de la arena, se remueve la arena y el agua del tubo y finalmente se añade agua hasta la marca que se le hizo al tubo y se mide el volumen en un cilindro graduado.
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

10. RESULTADOS

10.1. ENSAYOS MINERALÓGICOS

10.1.1. Reconocimiento macroscópico

Con el objetivo de identificar los minerales que contienen los agregados finos tales como arena de río y arena de peña, y los agregados gruesos como triturado de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ", se realizó un análisis macroscópico, teniendo en cuenta que este reconocimiento se desarrolló principalmente con la ayuda de un estereoscopio o en su lugar una lupa. Para cada agregado se debe seleccionar un número de granos igual o superior a 25 (Corbí & Martínez, 2015), con el fin de reducir la muestra a esta cantidad se efectuó el ensayo descrito en la NTC 3674 "Practica para la reducción del tamaño de las muestras de agregados, tomadas en campo, para la realización de ensayos". En el caso de los agregados finos arena de peña y arena de río, se tomó una cantidad de granos superior debido a que estas partículas eran bastante pequeñas. Para los agregados gruesos se tomó una cantidad menor ya que se complementó con la identificación obtenida de los ensayos petrográficos. En la imagen que se muestra a continuación se presenta el procedimiento descrito anteriormente para cada tipo de agregado.

Figura 33. Muestras seleccionadas para el ensayo macroscópico



➤ **ARENA DE RÍO.**

Con el objetivo de identificar los minerales que contiene la arena de río tomada del Acopio ubicado en el municipio de Sopo, se tomaron 106 gramos del agregado como se muestra a continuación:

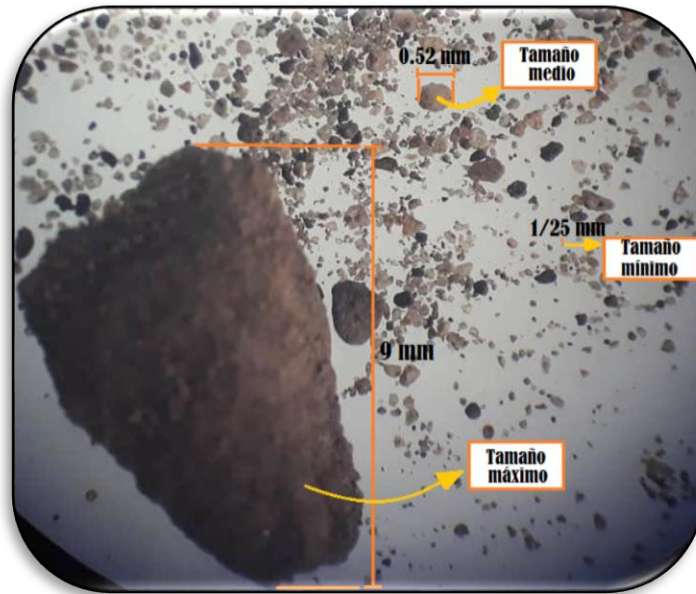
Figura 34. Muestra de arena de río empleada para el reconocimiento macroscópico



Posteriormente se analizaron algunas características de la muestra de agregado como su tamaño de grano y selección, su composición, su forma y color.

- **Composición:** Este agregado está constituido por granos de arenisca, compuesto por minerales de cuarzo y fragmentos de roca. Al analizar la muestra de agregado no fue posible encontrar partículas bioclásticas ya sean restos de organismos como conchas, caparazones, entre otros. Se identificó que el número de partículas resistentes a la meteorización, es decir de minerales de cuarzo, es de 72, mientras que las partículas fácilmente alterables ya sean fragmentos de roca y micas es de 34. Debido a que el número de partículas fácilmente alterables es menor a las resistentes, es posible establecer que el agregado ha estado expuesto a un transporte de alta intensidad o a procesos de meteorización considerable.
- **Tamaño de grano:** Para determinar los tamaños de los granos de la arena de río analizada fue necesario emplear un calibrador pie de rey obteniéndose de esta manera un tamaño mínimo de 0.04 mm, un tamaño medio de 0.52 mm y un tamaño máximo de 9 mm, como se presenta en la siguiente imagen.

Figura 35. Tamaños de granos de la arena de río



- **Selección:** La selección hace referencia al grado de similitud en el tamaño de grano de las partículas por lo que se considera que un sedimento se encuentra bien seleccionado si todas sus partículas presentan el mismo tamaño y por el contrario si las partículas presentan diferencias de tamaño, este estará mal seleccionado (Corbí & Martínez, 2015). De acuerdo a lo anterior es posible establecer que el agregado se encuentra mal seleccionado, debido a la variedad de tamaños que presenta varía de 1/25 mm a 9 mm.
- **Forma:** Para determinar el redondeamiento y esfericidad de los granos del agregado, fue necesario emplear la figura 35.

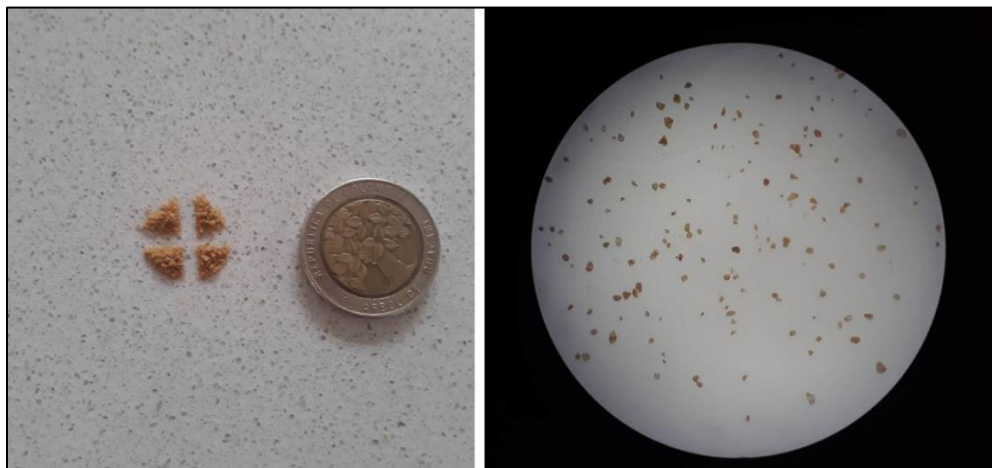
Teniendo en cuenta que el redondeamiento indica el grado de suavidad que presenta la superficie de un grano o la angulosidad de los contornos de las partículas (Corbí & Martínez, 2015), fue posible establecer que los granos de la arena de río son subredondeados a redondeados (**SR-R**). Por su parte, la esfericidad corresponde a la similitud de las partículas del agregado con figuras geométricas como una esfera, un disco y un prisma (Corbí & Martínez, 2015), por esta razón se determinó que este agregado presenta una forma esférica a subprimático (**E-SP**).

- **Color:** El color de los granos del agregado se encuentra relacionado con la composición de sus minerales, que en el caso de los minerales de cuarzo encontrado se identificaron colores blancos, translucidos e incoloros. Por su parte, los fragmentos de roca y las micas como biotita y moscovita presentan colores ocres, negros y café.

➤ **ARENA DE PEÑA.**

Para realizar el reconocimiento macroscópico de las principales características de la arena de peña, tomada del Acopio de la cantera Rodeb en el municipio de Sopó, se seleccionó una muestra compuesta por 185 granos, luego de realizar cuarteos sucesivos. La gran cantidad de granos seleccionados para el reconocimiento se debe al tamaño reducido de las partículas.

Figura 36. Muestra de arena de peña empleada para el reconocimiento macroscópico. Izquierda: comparación en tamaño de la muestra en cuarteo con una moneda. Derecha: Muestra seleccionada vista en el estereoscopio.

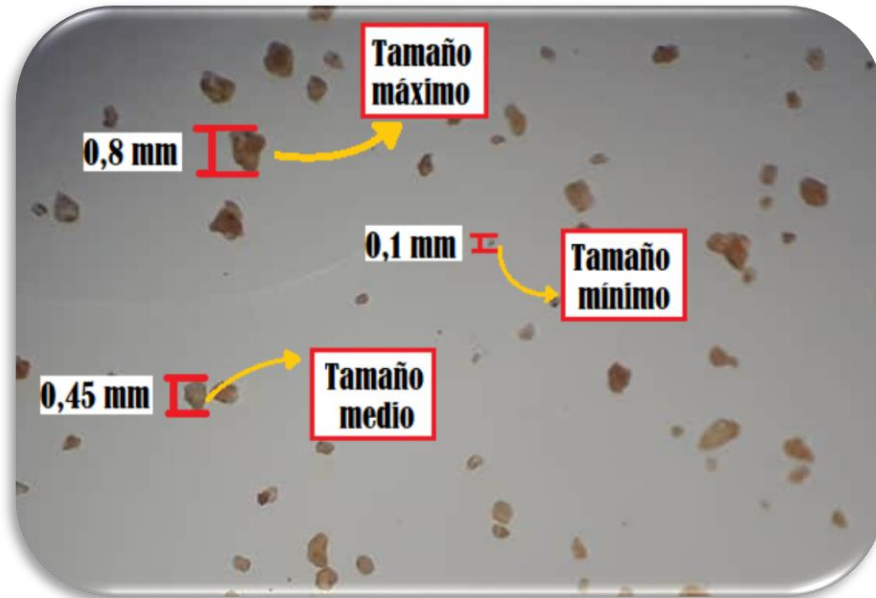


A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el reconocimiento macroscópico, en el cual se analizaron las variables de tamaño de grano, selección, composición, forma y color.

- **Composición:** La muestra seleccionada reveló la presencia de un único mineral, el cuarzo. De acuerdo con lo que es posible identificar con ayuda del estereoscopio, los 185 granos seleccionados corresponden a partículas resistentes, es decir de cuarzo, lo que indica que el agregado ha estado sometido a procesos de transporte energético y que además su madurez composicional es alta. Se evidencia también la ausencia de bioclastos.
- **Tamaño de grano:** Con ayuda del estereoscopio y del pie de rey se determinaron los tamaños aproximados de cada grano. En el caso de la

arena de peña el tamaño máximo fue de 0,8 mm, el tamaño medio de 0.45 mm y el tamaño mínimo fue de 0,1 mm.

Figura 37. Tamaños de granos de la arena de peña.



- **Selección:** De acuerdo con los tamaños encontrados en la arena de peña fue posible establecer que la selección de la misma es media a alta. Esto indica que existe una similitud considerable en el tamaño de los granos.
- **Forma:** De acuerdo con la figura 37 se estableció que la redondez de la arena de peña varía entre subredondeado (**SR**) a subanguloso (**SA**). En cuanto al grado de esfericidad, este agregado se clasifica como subprismático (**SP**) a esférico (**E**). Teniendo en cuenta que la madurez textural de un sedimento está relacionada con granos muy redondeados, muy esféricos y con una buena selección, es posible determinar que la madurez textural de la arena de peña es media.
- **Color:** Los granos de cuarzo presentes en el agregado exhiben colores que varían entre traslucido, amarillo, marrón y gris.

➤ **TRITURADO DE ½"**

Con el fin de analizar y determinar los minerales presentes en el triturado de ½", se tomaron 20 granos del agregado como se observa a continuación:

Figura 38. Muestra de triturado de ½” para el reconocimiento macroscópico




Las características de los agregados como su composición, tamaño y selección, forma y color se describen a continuación:



- Composición y forma

De forma general, este agregado se encuentra constituido por fragmentos líticos, cristales de cuarzo, moscovita y algunos cristales de pirita. Asimismo, presenta un redondeamiento subredondeado (SR) – redondeado (R) y una esfericidad subprimática (SP) – esférica (E). Las 20 muestras tomadas de este agregado fueron analizadas de las cuales se identificaron las siguientes características:

Tabla 23. Composición mineralógica y forma de los granos del triturado de ½”

Número	Composición	Forma	Grano
1	Arenisca cuarzosa constituida por fragmentos líticos y óxidos de hierro. Se identificó que se encuentra bastante fracturado	Subredondeado (SB) - subangular (SA)	

2	Litoarenita compuesta por fragmentos litoareníticos y cristales de cuarzo y moscovita	Subredondeado (SB) - subangular (SA)	
3	Cuarzoarenita constituida por cristales de cuarzo, moscovita y fragmentos líticos. Este grano presenta algo de matriz y material carbonoso	Subredondeado (SB) - subangular (SA)	
4	Arenisca feldespática compuesta por fragmentos líticos, cristales de feldespato y cuarzo	Subangular (SA) – Angular (A)	
5	Litoarenita compuesta principalmente por fragmentos líticos y por cristales de moscovita y pirita	No es posible identificar la forma de sus granos, debido a que se encuentran bastante compactos	
6	Cuarzoarenita constituida principalmente por cristales de cuarzo (En un porcentaje alrededor del 90%) y pocos fragmentos líticos	Subredondeado (SB) a redondeado (R)	
7	Cuarzoarenita formada por minerales de cuarzo con mucha matriz en su zona clara, fragmentos líticos en su parte oscura y pocos cristales de pirita	Subangular (SA) – Subredondeado (SB)	
8	Fragmento de roca lítica. No fue posible encontrar otros minerales en este grano por la unión de los mismos y sus colores oscuros	Subredondeado (SB)	

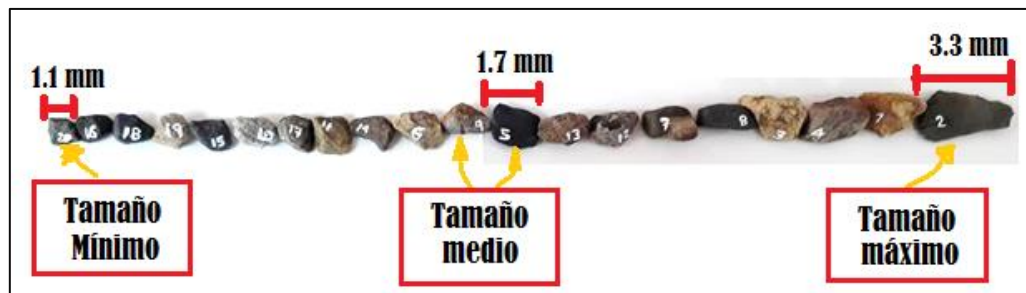
9	Cuarzoarenita compuesta principalmente por cristales de cuarzo y fragmentos líticos. Este grano presenta una matriz de grano fino y bastante existencia de oxidación	Subangular (SA)	
10	Cuarzoarenita constituida por cristales de cuarzo. Presenta matriz de grano fino y machas con oxidación de cristales de pirita	Subangular (SA) – Subredondeado (SB)	
11	Litoarenita constituida por cristales de cuarzo. Este grano presenta bastante existencia de matriz oxidada	No se identifica la forma de sus granos, debido a que son bastante pequeños	
12	Litoarenita compuesta por fragmentos líticos, gran cantidad de cristales de cuarzo, poca matriz y cristales de moscovita	Subangular (SA) – Subredondeado (SB)	
13	Cuarzoarenita compuesta por minerales de cuarzo en gran proporción, pirita y moscovita, también presenta matriz con mucha oxidación	Redondeado (R) – Subredondeado (SB)	
14	Cuarzoarenita conformada por cristales de cuarzo, fragmentos de roca y líticos, además, presenta bastante matriz	Subangular (SA) – Subredondeado (SB)	
15	Chert conformado por sílice microcristalino	Subangular (SA) – Subredondeado (SB)	
16	Litoarenita	Subredondeado (SB)	

17	Agregado de roca ígnea constituido por cristales de cuarzo, moscovita, minerales ferromagnesianos por sus colores negros, además presenta bastante oxidación	Subredondeado (SB) - Subangular (SA)	
18	Litoarenita conformada por fragmentos líticos, moscovita y cristales de pirita	No es posible identificar la forma de los granos debido a su tamaño reducido	
19	Cuarzoarenita constituida principalmente por cuarzo y algunos fragmentos líticos	Subredondeado (SB)	
20	Litoarenita compuesta por fragmentos líticos, minerales de cuarzo y pocos cristales de pirita y moscovita. Se identificó que este grano presenta bastante matriz	Subangular (SA)	

- **Tamaño de los granos**

Los tamaños de los granos del triturado de 1/2" analizado fueron de 1.1 mm para el tamaño mínimo, 1.7 mm para el tamaño medio y 3.3 mm para el máximo. En la siguiente imagen se puede observar la diferencia de tamaños de este agregado.

Figura 39. Tamaño de los granos del triturado de 1/2"



- **Selección:** Al analizar la selección de este agregado se identificó que presenta una mala selección debido a que como se observó en la imagen anterior estos granos tienen gran variedad de tamaños, lo que está relacionado directamente con los procesos industriales a los que ha estado sometido, al tratarse de un agregado artificial.
- **Color:** El color de los granos del triturado se encuentra directamente relacionado con la composición de sus minerales que para el caso de los minerales de pirita se observan colores amarillos, para los minerales de moscovita colores plateados, para los cristales de cuarzo colores blancos y grises translúcidos y para los minerales ferromagnesianos colores negros y cafés.

➤ **TRITURADO DE 3/4"**

Para el caso del triturado de 3/4" se seleccionaron 20 granos siguiendo la metodología establecida para cuarteo. A continuación, se presenta la muestra seleccionada.

Figura 40. Muestra de triturado de 3/4" para el reconocimiento macroscópico.














Los resultados de la caracterización macroscópica para composición, tamaño, selección, forma y color se presentan a continuación.








- **Composición y forma**



De forma general el triturado de 3/4" se encuentra compuesto por cuarzo, fragmentos de roca, moscovita y pirita. Su grado de redondez varía entre subredondeado (SR) y redondeado (R) y su esfericidad varía entre esférico (E) y subprismático (SP). A continuación, se presenta la composición y selección de cada grano.

Tabla 24. Composición mineralógica y forma de los granos del triturado de 3/4".

Número	Composición y forma	Grano
1	Arenisca compuesta por fragmentos líticos, moscovita y cristales de cuarzo en bajo porcentaje. Este grano presenta gran cantidad de matriz arcillosa	
2	Cuarzoarenita con alto contenido de cuarzo que presenta un tamaño significativo de sus granos. Este agregado contiene matriz en porcentaje considerable	
3	Litoarenita que está compuesta principalmente por fragmentos de roca. También se encuentran cristales de cuarzo y un porcentaje de matriz bastante bajo	
4	Litoarenita, ya que su principal componente son los fragmentos líticos. Este grano presenta cristales de cuarzo y poca matriz; su grado de redondez varía entre subredondeado (SR) y redondeado (R)	
5	Cuarzoarenita, lo que indica que el mineral que se presenta en mayor proporción es el cuarzo. Se observa una matriz escasa y óxidos de hierro. La redondez varía entre redondeado (R) y subredondeado (SR)	

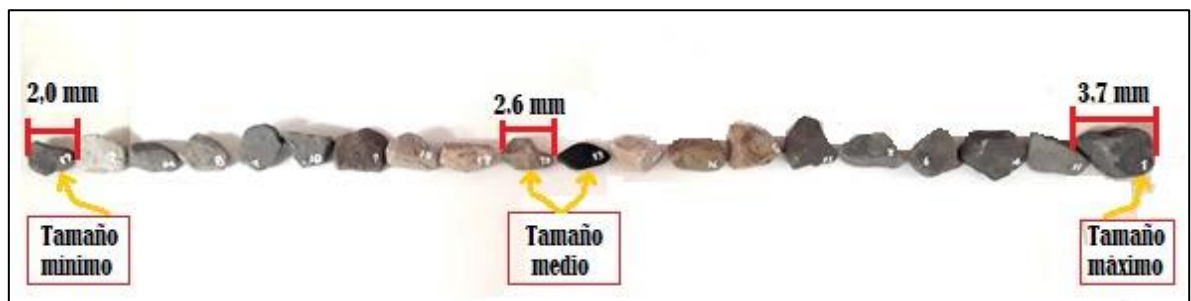
6	Litoarenita que presenta en mayor porcentaje fragmentos líticos, además de cristales de cuarzo y moscovita. La redondez, que se identifica con dificultad, varía entre redondeado (R) y subredondeado (SR)	
7	Litoarenita en la que es posible identificar fragmentos de roca, además de algunos cristales de moscovita. La cantidad de matriz es considerable y la presencia de óxidos es bastante. El tamaño de los granos no permite identificar el grado de redondez	
8	Cuarzoarenita, en la que se identifica gran cantidad de cristales de cuarzo bien compactados. Se identificó la presencia de matriz en poca proporción y algunos cristales de moscovita. La redondez de los cristales es subredondeada (SR)	
9	Litoarenita cuyo principal constituyente son los fragmentos líticos, además de cristales de moscovita en baja proporción, cuarzo y óxidos de hierro. Los minerales son de grano muy fino por lo cual no es posible identificar su forma	
10	Cuarzoarenita que presenta algunos fragmentos líticos y cristales de moscovita en porcentaje considerable en una de sus caras. También se evidencia alto contenido de matriz y grado de redondez subanguloso (SA)	
11	Litoarenita, que además de fragmentos de roca presenta minerales de cuarzo y moscovita. Se identifica la matriz arcillosa en porcentaje considerable y su redondez es subangulosa (SA)	

12	Litoarenita que presenta fragmentos líticos; y minerales de pirita y moscovita en menor proporción. En este grano es posible observar óxidos de hierro y su redondez es subredondeada (SR)	
13	Chert con poca matriz. Sus granos se encuentran bastante compactos, por lo que es difícil identificar sus granos	
14	Litoarenita cuyos principales constituyentes son los fragmentos líticos, carbonatos, óxidos y matriz en cantidad considerable	
15	Cuarzoarenita, con presencia de cristales de cuarzo, algunos fragmentos líticos por una de sus caras, la cual presenta óxidos en bastante porcentaje; y pocos minerales de moscovita. La cantidad de matriz es considerable. El grado de redondez es subredondeado (SR)	
16	Litoarenita, que además de fragmentos de roca presenta minerales de cuarzo, pirita y moscovita en bajo porcentaje, con abundante matriz	
17	Cuarzoarenita que contiene cristales de cuarzo, y algunos fragmentos líticos. Tiene bastante matriz y sus granos presentan grado de redondez subangular (SA)	
18	Litoarenita que contiene gran cantidad de poros, cristales de moscovita y pirita en baja proporción	

19	Litoarenita que además de contener fragmentos de roca, presenta minerales de moscovita y pirita. Tiene gran cantidad de matriz	
20	Litoarenita, que contiene fragmentos de roca y pequeños minerales de moscovita y cuarzo. Este grano se caracteriza por la presencia de óxidos	

- **Tamaño de grano:** Con ayuda del pie de rey se realizó la medición del tamaño de los granos que conforman la muestra. En este caso el tamaño máximo fue de 3,7 mm, el tamaño medio de 2,6 mm y el tamaño mínimo de 2,0 mm.

Figura 41. Tamaños de granos del triturado de ¾".



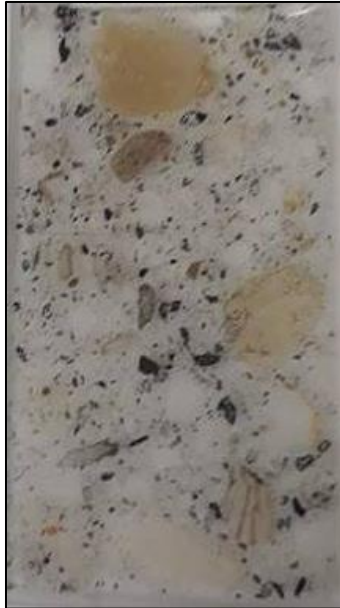
- **Selección:** De acuerdo con los tamaños encontrados en la muestra seleccionada para el reconocimiento es posible establecer que se encuentra mal seleccionado debido a la variación de sus tamaños, lo que nos indica que posiblemente el agregado no ha estado sometido a procesos de transporte intenso; sin embargo, es necesario mencionar que el triturado corresponde a un agregado artificial, por lo que es imposible establecer los procesos de transporte que ha experimentado con base en su selección; ya que esta última está relacionada con los procesos de trituración de los que ha sido sujeto.
- **Color:** Los granos que se observan en el agregado presentan colores que varían entre gris claro y oscuro, café, ocre, negro, amarillo y algunos granos con colores claros semejantes al blanco.

10.1.2. Petrografía

➤ ARENA DE RÍO

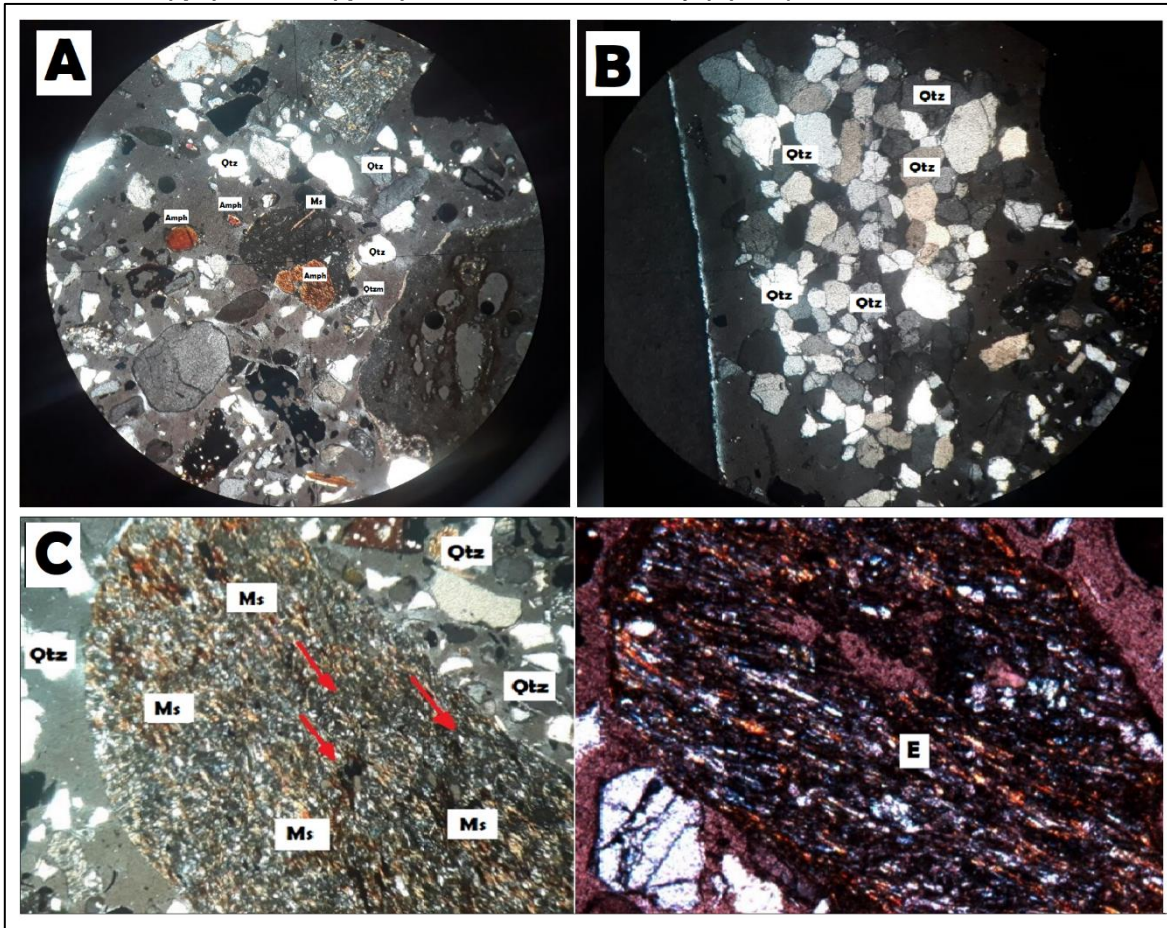
Con el fin de determinar los minerales presentes en la arena de río tomada de la cantera Acopios, se realizó el análisis petrográfico empleando para ello la sección delgada (Figura 42).

Figura 42. Sección delgada de la arena de río



Mediante el uso del microscopio petrográfico y el programa AxioVision es posible distinguir los minerales presentes en la muestra. En La sección delgada del agregado correspondiente a la arena de río se observan fragmentos de origen ígneo, sedimentario y metamórfico. Los de origen ígneo están compuestos de anfíboles, cristales de cuarzo, biotita y cuarzo microcristalino con extinción ondulante (Figura 43 A). Por su parte, los de origen sedimentario corresponden a agregados de arenisca constituida por minerales de cuarzo subangulares a subredondeados bastante cementados debido a que sus granos se encuentran unidos unos con otros; y con ausencia de matriz (Figura 43 B). El de origen metamórfico está formado por un agregado de esquisto compuesto principalmente por cristales de cuarzo, moscovita y en menor proporción biotita. Estos minerales de moscovita se encuentran bastante orientados, por lo que se establece que poseen textura lepidoblastica (Figura 43 C).

Figura 43. Sección delgada de arena de río. **A:** Agregados de origen ígneo. **B:** Agregados de roca arenisca de origen sedimentario. **C:** Agregado de esquisto de origen metamórfico. (**Amph**) Anfíboles, (**qtz**) Cuarzo, (**qtzm**) cuarzo microcristalino y (**E**) Esquisto.



En general, los principales minerales identificados corresponden a cristales de cuarzo y moscovita. Sin embargo, se han encontrado algunos cristales de anfíboles, plagioclasa, biotitas, feldespato potásico, piroxeno y circones y una matriz de grano fino (limo o arcilla) escasa en los agregados de origen sedimentario. El cuarzo sobresale, presenta colores blancos y algunos grises de primer orden, relieve medio, fracturamiento de tipo intragranular; y extinción ondulante que posiblemente pudo ocasionarse por las deformaciones de la roca o por altas presiones en el agregado de origen metamórfico.

Los cristales de moscovita, aparecen en menor proporción con respecto al cuarzo, sin embargo, es bastante abundante en esta sección delgada. Presenta diversa gama de colores como azul, rosado, naranja, amarillo y rojo de tercer orden; asimismo, se identifican sus planos de exfoliación, característica principal de este mineral debido a que se está dentro de la subclase de los filosilicatos cuya característica común es el hábito laminar.

La plagioclasa, se presenta en proporciones menores a los dos minerales anteriormente mencionados; se caracteriza por sus colores grises y blancos de primer orden, bajo relieve, clivaje fácilmente identificable y fracturamiento intragranular que pudo haberse causado por el desgaste y alteración de la roca.

Al igual que la plagioclasa, los cristales de anfíbol hornblenda se encuentran en cantidades similares; muestra colores marrones, amarillos y naranjas a rojizos. Se identifican algunas características de este mineral como su relieve medio a alto, formas hexagonales y sus líneas de exfoliación con ángulos menores a 90° ; a diferencia de la biotita, que presentan extinción recta a 90° como se observó en esta sección delgada de agregado. Los cristales de biotita poseen colores amarillos y naranjas de tercer orden, exfoliación laminar y un relieve medio a alto menor al anfíbol.

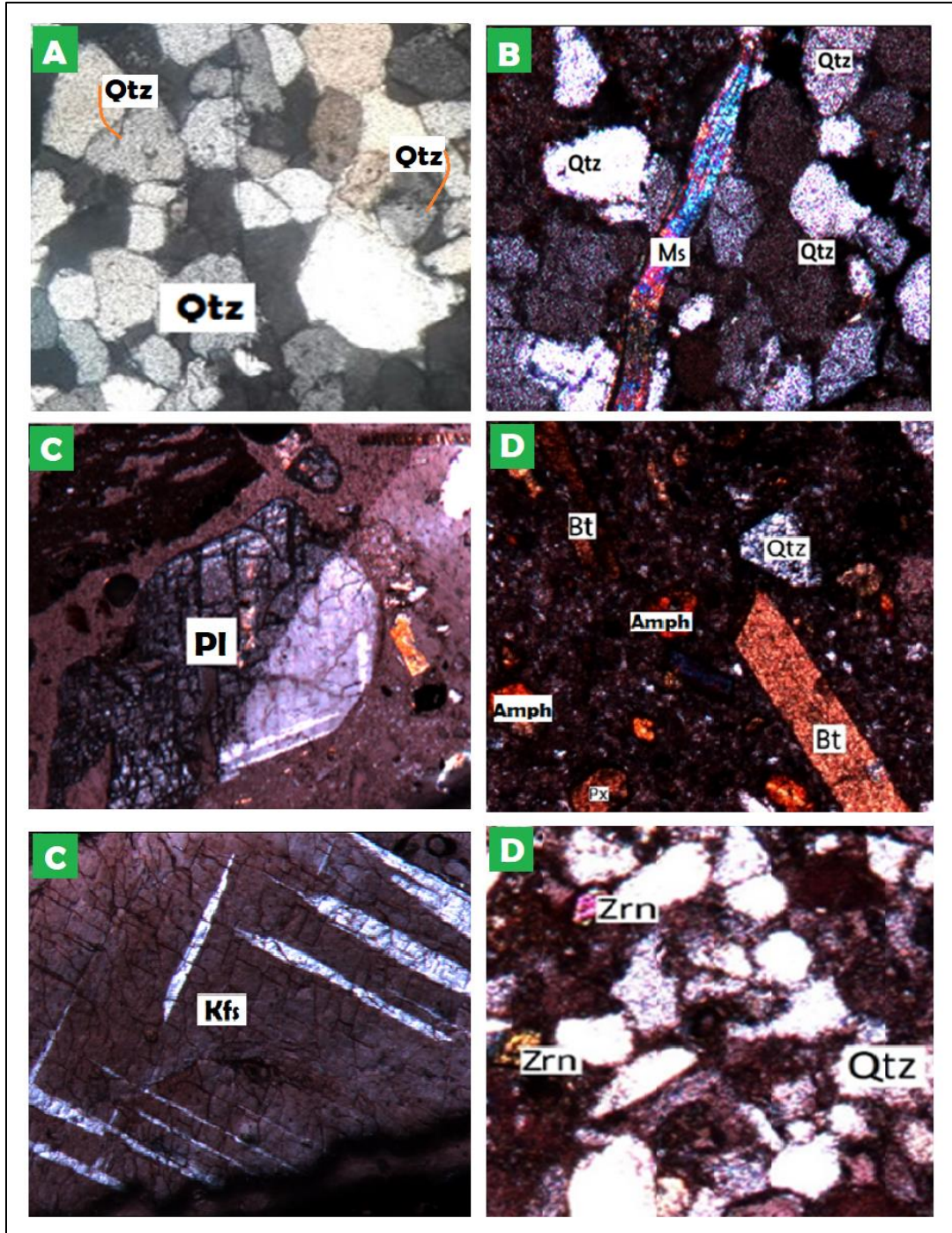
Finalmente, existen cantidades de cristales como piroxenos, circones y feldespato potásico muy reducidas en relación a los mencionados. En el caso del mineral de piroxeno, se encuentran colores rojos y marrones, relieve medio y líneas de exfoliación perfectamente rectas a 90° . Por su parte, los cristales de circón se identifican por su relieve alto y por su amplia gama de colores como rosado, verdes, azules y amarillos.

Los cristales de feldespato potásico presentan bajo relieve y colores grises, blancos y marrones de primer orden, así como planos perpendiculares que representan el clivaje característico de este mineral.

Tabla 25. Composición mineralógica de la arena de río y características de los minerales encontrados.

ARENA DE RÍO								
MINERALES ENCONTRADOS			MATRIZ (A) Abundante (I) Intermedia (E) Escasa (N) No existe	EXTINCIÓN ONDULANTE			FRACTURAMIENTO (A) Intragranular (B) Intergranular (C) No existe	GRADO DE FRACTURAMIENTO (A) Alto (B) Medio (C) Bajo
MÁS ABUNDANTE	MINERAL INTERMEDIO	MENOS ABUNDANTE		SI	NO	GRADO		
Cuarzo (Subredondeado y angular) Moscovita	Plagioclasa y anfíbol	Biotita, piroxeno, citrón y feldespato potásico, cuarzo microcristalino	(E) De grano fino (limo o arcilla)	x		-	A	C

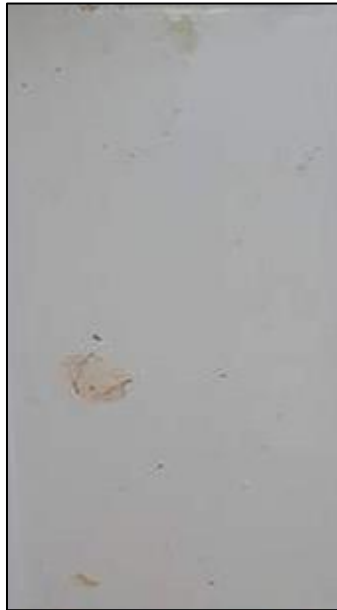
Figura 44. Minerales de la sección delgada de arena de río. (**Qtz**) Cuarzo, (**Ms**) Moscovita, (**Pl**) Plagioclasa, (**Amph**) Anfíbol, (**Bt**) Biotita, (**Kfs**) Feldespato potásico y (**Zrn**) Circón. **A)** Minerales de cuarzo, algunos fracturados y con extinción ondulante, **B)** Moscovita en medio de cristales de cuarzo, **C)** Plagioclasa con fracturas intergranulares, **D)** Cristales de anfíbol, biotita, piroxeno y cuarzo, **E)** Cristal de feldespato fracturado y **F)** Cristales de circón y cuarzo.



➤ ARENA DE PEÑA

Con el fin de identificar la composición mineralógica de la arena de peña se empleó el microscopio petrográfico y la sección delgada correspondiente a este agregado.

Figura 45. Sección delgada del triturado de la arena de peña.

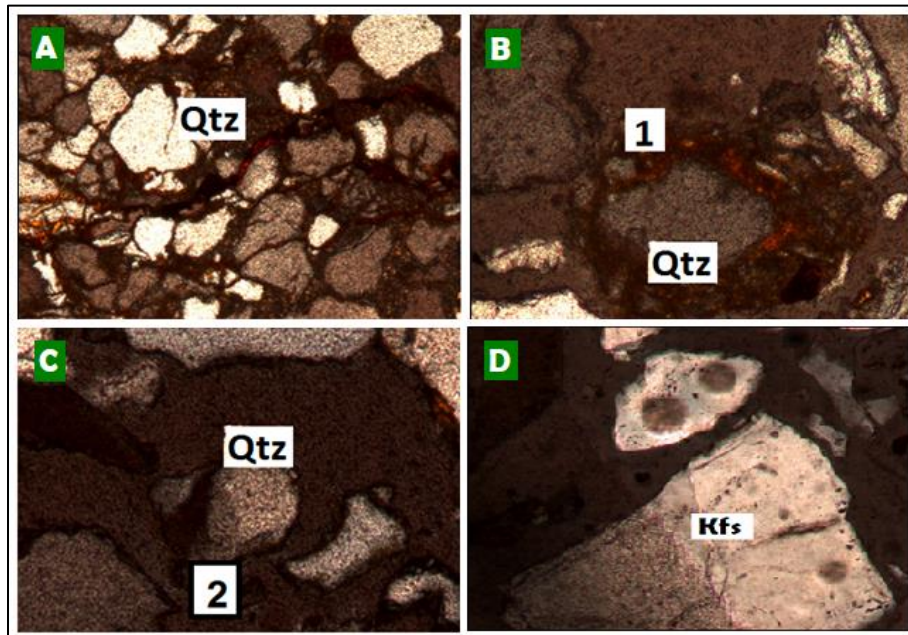


A partir del análisis realizado fue posible determinar que la arena de peña está compuesta principalmente por granos de cuarzo y granos de feldespato en menor cantidad. El cuarzo que se observa en este agregado se caracteriza por presentar relieve medio y un color de interferencia gris claro a blanco de primer orden debido a la interferencia de la luz con el mineral. También se observa el fenómeno de extinción ondulante, algunas superficies fracturadas de tipo intragranular, óxidos de hierro en medio de los granos de cuarzo y un grado de redondez que varía entre angular (A) y subredondeado (SR). Por su parte el feldespato potásico presenta un color de interferencia gris de primer orden, relieve bajo y alteración en la superficie del grano. La matriz que presenta este agregado es de grano fino (limo o arcilla).

Tabla 26. Composición mineralógica de la arena de peña y características de los minerales encontrados.

ARENA DE PEÑA								
MINERALES ENCONTRADOS			MATRIZ (A) Abundante (I) Intermedia (E) Escasa (N) No existe	EXTINCIÓN ONDULANTE			FRACTURAMIENTO (A) Intragranular (B) Intergranular (C) No existe	GRADO DE FRACTURAMIENTO (A) Alto (B) Medio (C) Bajo
MÁS ABUNDANTE	MINERAL INTERMEDIO	MENOS ABUNDANTE		SI	NO	GRADO		
Cuarzo (angular y subredondeado)	Presencia de óxidos de hierro	Feldespatos	(I) De grano fino (limo o arcilla)	x		-	A	C

Figura 46. *Minerales de la sección delgada de arena de peña. (Qtz) Cuarzo, (Kfs) Feldespato, (1) Óxidos de hierro, (2) Extinción ondulante. A) y B) Granos de cuarzo con óxidos de hierro entre los granos. C) Cuarzo con extinción ondulante. D) Granos de feldespato potásico.*



➤ **TRITURADO DE 1/2"**

Con el propósito de realizar una descripción detallada de los minerales que se encuentran en el triturado de 1/2" y de facilitar el análisis de la muestra, se han enumerado los granos dentro de la sección delgada (Figura 50)

Figura 47. *Sección delgada del triturado de 1/2"*



De forma general, los cristales que se encuentran en el triturado de ½" son el cuarzo, la moscovita, el feldespato y circones. Por su parte, el cuarzo es el mineral predominante, que presenta colores de interferencia grises y blancos de primer orden, además de exhibir grados de redondez que varía entre angular y subredondeado. En algunos granos como en el 1,2,7, 10 y 13 fue posible evidenciar el fenómeno de extinción ondulante, que nos indica que posiblemente estos granos han pasado por sucesos de alta presión o que provienen de una roca metamórfica. De igual forma, algunos granos de cuarzo presentan fracturamiento intergranular e intragranular, presentándose con mayor frecuencia el de tipo intragranular. El fracturamiento que se observa es bastante intenso en algunos granos, de grado medio y bajo en otros.

La moscovita, que aparece en segundo lugar en abundancia, presenta color azul, verde y amarillo de tercer orden y la exfoliación laminar característica. En forma aislada se encuentran cristales de feldespato bastante alterados, por lo cual se confunde con otros minerales o no se identifican con facilidad algunas características que le son propias, como su color de interferencia gris de primer orden. Finalmente, se encuentran cristales de circón de forma diseminada y en bajo porcentaje, identificados por sus colores de interferencia verde, amarillo, azul, naranja y rosado de tercer y cuarto orden y por el alto relieve que se observa en el microscopio con nicoles paralelos.

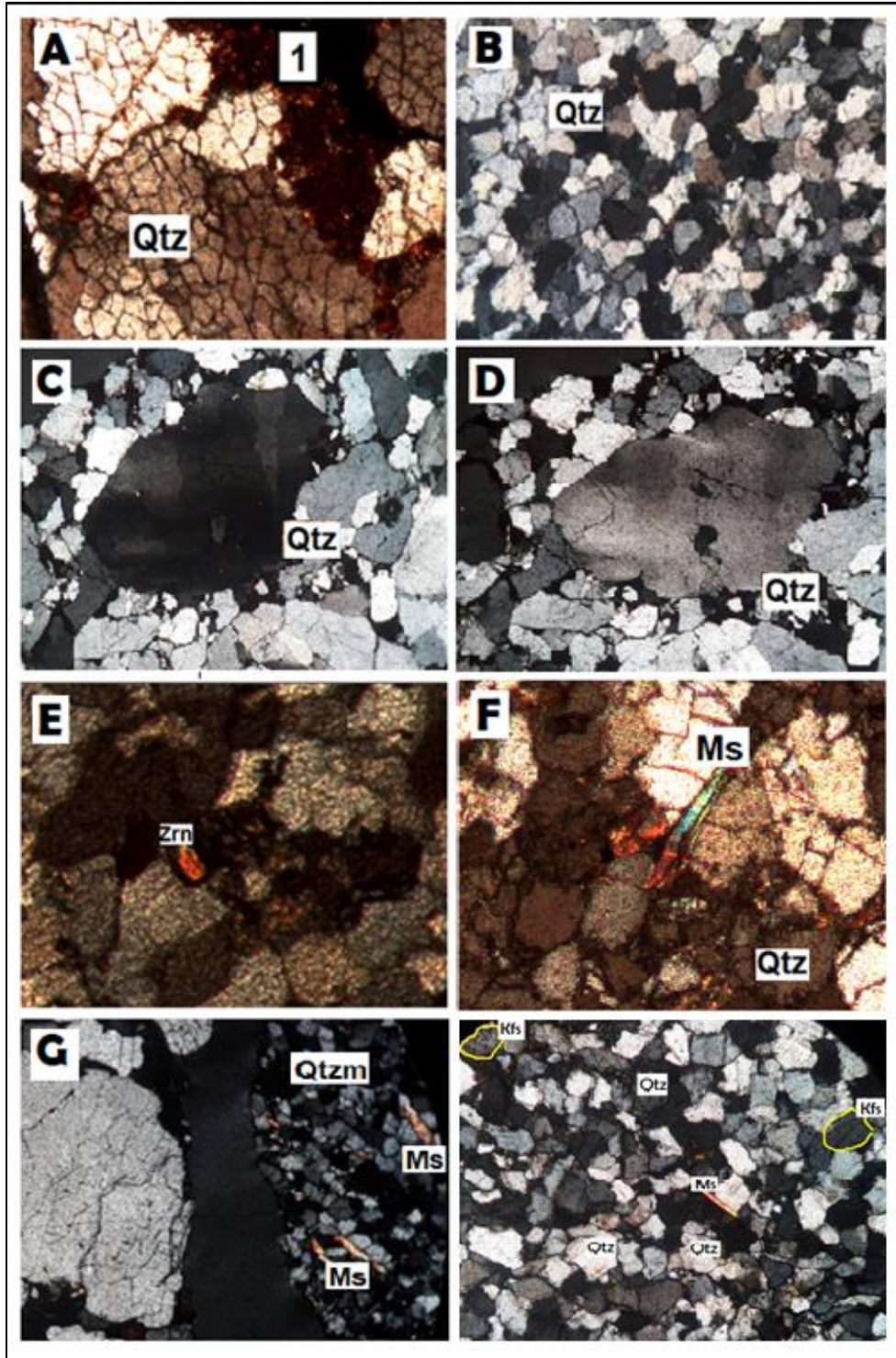
La matriz observada es de arcilla en poca cantidad excepto en los granos 4, 5, 6 y 13 en los cuales se presenta matriz abundante; algunos se observan de forma escasa o nula, es decir que algunos de ellos se encuentran cementados.

Tabla 27. Composición mineralógica del triturado de ½” y características de los minerales encontrados.

TRITURADO DE ½”									
GRANO	MINERALES ENCONTRADOS			MATRIZ	EXTINCIÓN ONDULANTE			FRACTURAMIENTO	GRADO DE FRACTURAMIENTO
	MÁS ABUNDANTE	MINERAL INTERMEDIO	MENOS ABUNDANTE	(A) Abundante (I) Intermedia (E) Escasa (N) No existe	SI	NO	GRADO	(A) Intragranular (B) Intergranular (C) No existe	(A) Alto (B) Medio (C) Bajo
1	Cuarzo (subangular y subredondeado)		Carbonatos (que están cementando el cuarzo) y óxidos de hierro (hacen parte de la matriz)	(I) De arcilla	x		-	A y B	A
2	Cuarzo		Circón y Moscovita	(E) De arcilla	x		25°	C	-
3	Cuarzo	Moscovita	Circón y óxidos de hierro	(E) De arcilla		x		A y B	A
4	Cuarzo (Angulares)		Óxidos de hierro	(A) De arcilla		x		A	C
5	Cuarzo (Angulares)		Moscovita (sin orientación), circón y óxidos de hierro (forman parte de la matriz)	(A) De arcilla		x		B	C

6	Cuarzo (Sub angulares)		Moscovita (sin orientación), circón y óxidos de hierro (forman parte de la matriz)	(A) De arcilla		x		C	-
7	Cuarzo		Feldespato y circón	(N)	x		-	C	-
8	Cuarzo		Moscovita	(N)		x		A y B	B
9	Cuarzo (Angulares)		Moscovita (deformada)	(N)		x		A y B	B
10	Cuarzo		Cuarzo microcristalino , moscovita, feldespato (alterado) y óxidos de hierro (hacen parte de la matriz)	(E) De arcilla	x		15°	A	A
11	Cuarzo	Moscovita	Feldespato (alterado)	(E) De arcilla		x		C	-
12	Cuarzo		Circón	(N)		x		A (por proceso de fabricación)	B
13	Cuarzo (Muy anguloso)		Moscovita y circón	(A) De arcilla	x			B (por proceso de fabricación)	C
14	Cuarzo (Subangular a subredondeado)		Moscovita y feldespato (alterado)	(E) De arcilla		x		A	C

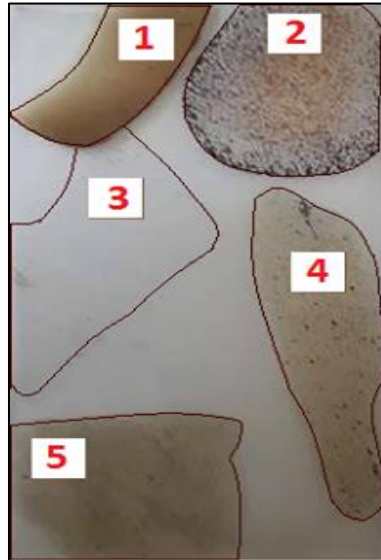
Figura 48. *Minerales de la sección delgada del triturado de 1/2". (Qtz) Cuarzo, (Zrn) Circón, (Ms) Moscovita, (Qtzm) Cuarzo microcristalino y (1) Óxidos de hierro. A) cuarzo fracturado. B) Cuarzo C) y D) cuarzo con extinción ondulante. E) Circón entre cristales de cuarzo. F) Moscovita en medio de cristales de cuarzo. G) Cristales de cuarzo, cuarzo microcristalino y moscovita. H) Cristales de feldespato.*



➤ TRITURADO DE 3/4"

Con el fin de identificar los minerales presentes en el triturado de 3/4" y de realizar un análisis detallado de la sección delgada, se ha dividido en 5 granos (Figura 49).

Figura 49. Sección delgada del triturado de 3/4".



El triturado de 3/4" se encuentra constituido por cristales de cuarzo, moscovita y en pequeñas proporciones circón y calcita (Figura 50). El cuarzo es el mineral más abundante en esta sección delgada, sus colores de interferencia son blancos y grises de primer orden, su relieve es medio a bajo y se evidencia que su redondez varía de angular a subredondeado. En general presenta fracturamiento de tipo intragranular. El fenómeno de extinción ondulante (grano 2) pudo ocasionarse por las deformaciones de la roca o por las altas presiones que manifiestan que son de origen metamórfico.

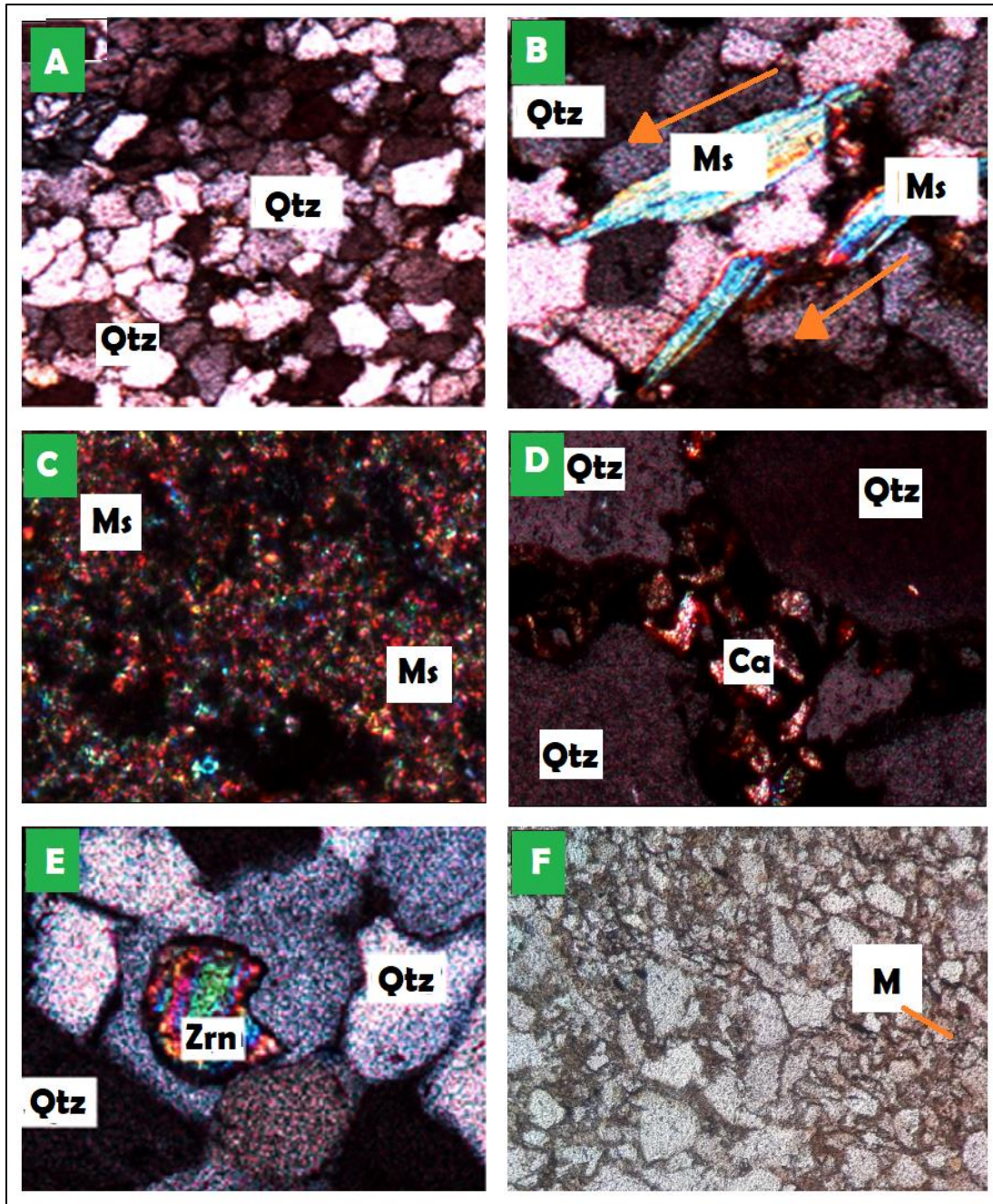
Respecto a los cristales de moscovita, la cantidad en la que presentan es menor a la del cuarzo, sus colores de interferencia varían entre azul, rosado, amarillo y verde de tercer orden, además, se identifica su relieve medio a alto y sus planos de exfoliación bien definidos. En el grano 4, es posible observar una leve orientación de los minerales de moscovita que puede indicar un metamorfismo incipiente. En la mayoría de los granos de esta sección delgada, se evidencia la existencia de matriz de grano fino (arcilla), que para el caso del grano 5, predomina por su cantidad, clasificando la madurez textural de este agregado como inmadura.

En último lugar, se encontraron cristales de circón con colores de interferencia verde, azul, rodado, naranja, amarillo y rojo de tercer orden; los cristales de calcita (carbonatos de calcio) presentan color marrón y amarillo y se encuentran como material cementante.

Tabla 28. Composición mineralógica del triturado de ¾" y características del mineral encontrado.

TRITURADO DE ¾"									
GRANO	MINERALES ENCONTRADOS			MATRIZ (A) Abundante (I) Intermedia (E) Escasa (N) No existe	EXTINCIÓN ONDULANTE			FRACTURAMIENTO (A) Intragranular (B) Intergranular (C) No existe	GRADO DE FRACTURAMIENTO (A) Alto (B) Medio (C) Bajo
	MÁS ABUNDANTE	MINERAL INTERMEDIO	MENOS ABUNDANTE		SI	NO	GRADO		
1	Moscovita		Cuarzo	(A) De arcilla		x	-	C	-
2	Cuarzo (Angulares a subredondeados)		Calcita (Carbonato de calcio, aparece como material cementante)	(I) De arcilla	x			A	C
3	Cuarzo (Angulares a subredondeados)	Moscovita	Circón	(E) De arcilla		x		A	C
4	Cuarzo (Subredondeados a angulares)	Moscovita (Con orientación)		(A) De arcilla		x		-	-
5	Cuarzo (Angulares)		Moscovita (sin orientación), circón	(A) De grano fino (limo o arcilla)		x		A	C

Figura 50. *Minerales de la sección delgada del triturado de ¼". (Qtz) Cuarzo, (Ms) Moscovita, (Zrn) Circón, (Ca) Carbonato de calcio, (M) Matriz de grano fino (arcilla o limo). A) Cristales de cuarzo, B) Moscovita orientada en medio de cristales de cuarzo, C) Cristales de moscovita en pequeños tamaños, D) Carbonato de calcio en medio de cristales de cuarzo, E) Circón entre cristales de cuarzo, F) Cristales de cuarzo con matriz de grano fino.*



10.1.3. Difracción de rayos x

El ensayo de difracción de rayos x fue realizado en los laboratorios de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG) en la ciudad de Belo Horizonte, Brasil; en el marco del proyecto de investigación denominado “Caracterización físico- química, mecánica y mineralógica de las areniscas utilizadas para construcción de la zona Franca de Tocancipa, en la cantera Rodeb y Acopios – Sector Hato Grande – Sopó” a cargo del Geólogo (Ph. D) Javier Eduardo Becerra Becerra. Para ello, se tomaron cuatro muestras de agregado Arena de río, arena de peña, triturado de 1/2” y triturado de 3/4”, de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 29. Resultados de ensayo de difracción de rayos x de los agregados

RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS X				
MUESTRA	DRX (MINERALES)			
	ALTO	MEDIO	BAJO	TRAZAS
Arena de Río	Cuarzo	Albita	Actinolita, Apatita (Cloro e hidrox), Biotita	Caolinita
Arena de Peña	Cuarzo	-	-	Caolinita
Triturado 1/2"	Cuarzo	-	-	Albita, Calcita, Caolinita, Moscovita
Triturado 3/4"	Cuarzo	-	-	Caolinita, Moscovita

Fuente: Tomado de ensayo de difracción de rayos x (DRX) realizado en la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG).

10.2. ENSAYOS FÍSICOS

Los ensayos físicos realizados para determinar las propiedades de los agregados y sus aptitudes como material para concreto y para filtros se listaron en el capítulo 8 del presente trabajo.

10.2.1. Ensayos físicos para concreto de los agregados finos

Los resultados obtenidos en los ensayos físicos realizados en los agregados para concreto se describen a continuación.

➤ **Granulometría**

Para obtener la gradación de la arena de río y arena de peña se realizó el procedimiento descrito en la NTC 77 – “Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos”, que consiste en hacer pasar la masa

seca seleccionada para el ensayo por una serie de tamices según lo expuesto en dicha norma y determinar la masa retenida en cada uno de ellos. Con el fin de determinar de forma más precisa el porcentaje de finos que contiene el agregado, se lavó el material por el tamiz No 200, según lo expuesto en la NTC 78 – “Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 μ m en agregados minerales”.

Figura 51. Procedimiento ensayo de granulometría de los agregados finos. **Izquierda:** Arena de peña, **Derecha:** Arena de río. **(1)** y **(2)** Ensayo de lavado, **(3)** y **(4)** Vertimiento de la muestra de agregado en la serie de tamices, **(5)** y **(6)** Agitación de los agregados.



A continuación, se presenta la masa seca inicial tomada para realizar el lavado del material, y la masa seca lavada por el tamiz No 200, masa con la cual se inicia el procedimiento de tamizado.

Tabla 30. Masa seca inicial y masa seca lavada por el tamiz No. 200 para arena de río y arena de peña.

MASA	ARENA DE RÍO (g)	ARENA DE PEÑA (g)
Masa seca inicial	400	495,39
Masa seca lavada por el tamiz No. 200	376,03	441,03

Posteriormente se realiza el tamizado del material empleando la masa obtenida luego de lavarla por el tamiz No.200 y secarla en el horno. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Tabla 31. Masa retenida en el ensayo de granulometría para arena de río y arena de peña.

ABERTURA TAMIZ ASTM N°	PESO RETENIDO (g)	
	ARENA DE RÍO	ARENA DE PEÑA
3/8 " (9,525 mm)	0	
N° 4 (4,75 mm)	23,2	1,52
N° 8 (2,36 mm)	89,72	2,52
N° 16 (1,19 mm)	64,37	1,97
N° 30 (0,59 mm)	51,73	4,46
N° 50 (0,297 mm)	53,13	190,2
N° 100 (0,15 mm)	45,73	198,9
N° 200 (0,075 mm)	23,83	36,55
Fondo	1,6	2,44
Σ	353,31	438,56
W finos	21,18	54,36
Error	0,43	0,56

A partir del peso retenido es posible determinar el porcentaje que pasa en cada tamiz con el fin de elaborar la curva granulométrica. Las ecuaciones empleadas se muestran a continuación:

- *W finos*

La masa de finos se calcula a partir de los datos obtenidos en el ensayo de lavado por el tamiz No. 200 como se observa a continuación.

$$W_{finos} = W \text{ masa seca inicial} - W \text{ masa seca lavada tamiz No. 200} \quad (1)$$

- *Error*: El porcentaje de error obtenido representa la corrección que se debe realizar al peso retenido por pérdidas de material durante la elaboración del ensayo. El error admisible debe ser menor a 1% para aceptar el ensayo.

$$Error = \frac{|\sum W_{ret} - W_{MSLTN^{\circ}200}|}{W_{MSLTN^{\circ}200}} * 100 \quad (2)$$

- *Peso retenido corregido*

El peso retenido se corrige a partir de la siguiente ecuación.

$$W_{ret.corr} = \frac{W_{ret} * W_{MSLTN^{\circ}200}}{\sum W_{ret}} \quad (3)$$

- *Porcentaje retenido acumulado*

$$\% Ret. acum = \frac{W_{ret.corr.acum}}{W_{MS}} * 100 \quad (4)$$

- *Porcentaje que pasa*

$$\%Pasa = 100\% - \%Ret. acum \quad (5)$$

Los resultados obtenidos y la curva granulométrica de la arena de río y la arena de peña, se muestran a continuación.

Tabla 32. Resultados ensayo de granulometría arena de río.

ASTM N°	W _{RETENIDO}	W _{RETENIDO CORREGIDO}	W _{RETENIDO ACUMULADO}	% _{RETENIDO ACUMULADO}	% _{PASA}
3/8 " (9,525 mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
N° 4 (4,75 mm)	23,20	23,30	23,41	6,20	93,80
N° 8 (2,36 mm)	89,72	90,11	113,93	30,16	69,84
N° 16 (1,19 mm)	64,37	64,65	178,06	47,35	52,65
N° 30 (0,59 mm)	51,73	51,96	230,02	61,17	38,83
N° 50 (0,297 mm)	53,13	53,36	283,38	75,36	24,64
N° 100 (0,15 mm)	45,73	45,93	329,31	87,58	12,42
N° 200 (0,075 mm)	23,83	23,93	353,24	93,94	6,06
Fondo	1,60	1,61	376,03	100,00	0,00
Σ	353,31	354,85			

- Curva granulométrica

Gráfico 1 Curva granulométrica de la arena de río.

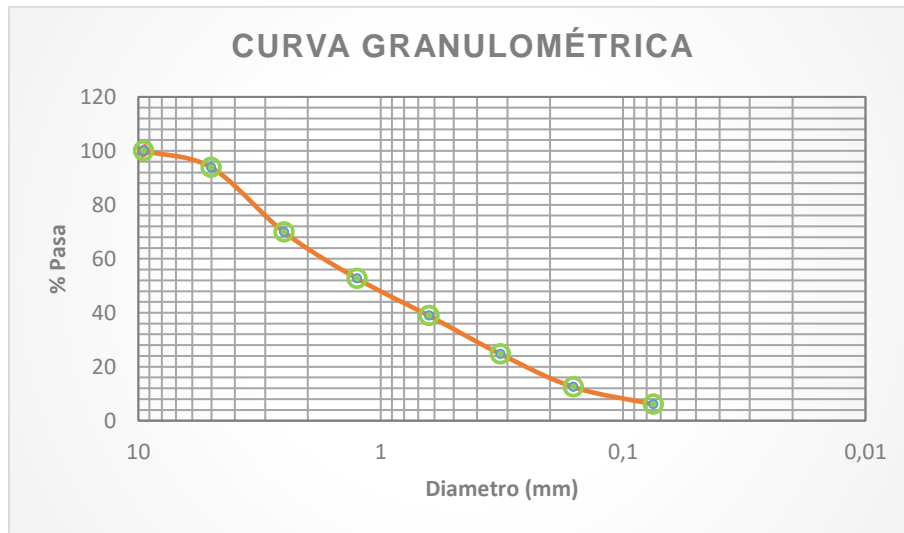
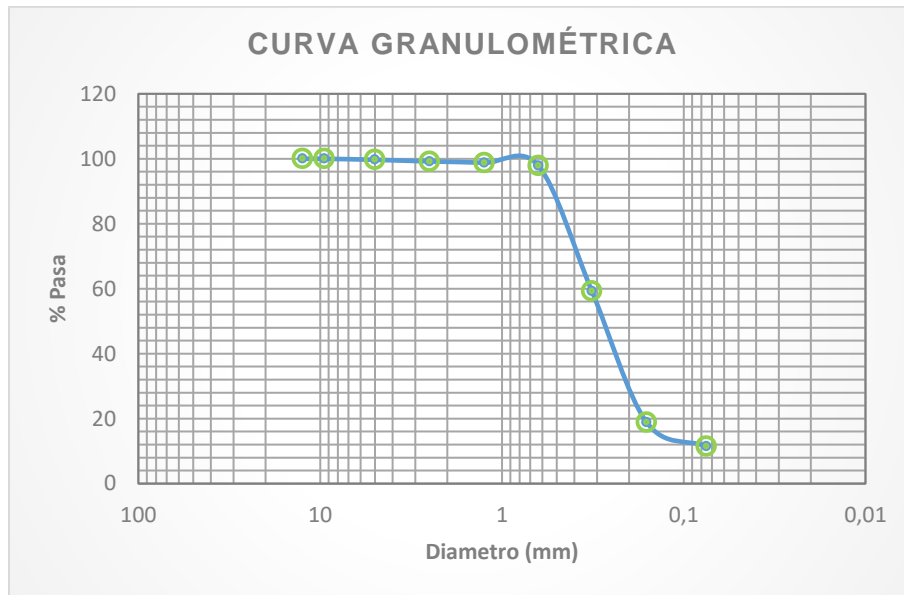


Tabla 33. Resultados ensayo de granulometría arena de peña.

ASTM N°	W_{RETENIDO}	$W_{\text{RETENIDO CORREGIDO}}$	$W_{\text{RETENIDO ACUMULADO}}$	$\%_{\text{RETENIDO ACUMULADO}}$
1/2 " (12,7 mm)	0,00	0,00	0,00	0,00
3/8 " (9,525 mm)	0,00	0,00	0,00	0,00
N° 4 (4,75 mm)	1,52	1,53	1,53	0,31
N° 8 (2,36 mm)	2,52	2,53	4,06	0,82
N° 16 (1,19 mm)	1,97	1,98	6,04	1,22
N° 30 (0,59 mm)	4,46	4,49	10,53	2,13
N° 50 (0,297 mm)	190,20	191,27	201,80	40,74
N° 100 (0,15 mm)	198,90	200,02	401,82	81,11
N° 200 (0,075 mm)	36,55	36,76	438,58	88,53
Fondo	2,44	2,45	495,39	100,00
Σ	438,56	441,03		

- *Curva granulométrica*

Gráfico 2 Curva granulométrica de la arena de peña.



➤ **Densidad y absorción**

La densidad y la absorción de la arena de río y la arena de peña se determinan siguiendo el procedimiento descrito en la NTC 237 – “Ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino”. En esta norma se indica que la muestra seca se debe sumergir en agua durante 24 horas, para posteriormente llevarla al estado SSS (Saturado Superficialmente Seco). Se comprueba que el material se encuentra en este estado llenando el molde cónico con la muestra, apisonarlo y verificando que, al levantar el molde, la muestra mantenga su forma con derrumbes parciales. Posteriormente se toma un picnómetro y se introducen en él 500 gramos de agregado, se agita y se eliminan las burbujas de aire. Se determina la masa total del picnómetro, la muestra y el agua. Luego se toma esta muestra, se deja secar en el horno y se registra su masa. Finalmente se toma la masa del picnómetro lleno de agua.

Figura 52. Procedimiento ensayo de densidad y absorción de los agregados finos. **Derecha:** arena de río, **Izquierda:** arena de peña. (1) y (2) molde cónico para verificar el estado sss, (3) Comprobación de la temperatura del líquido dentro del picnómetro de 23°C y (4) Picnómetro con bomba de vacío para eliminar burbujas de aire.



Los valores obtenidos al realizar el procedimiento descrito para los dos agregados finos se muestran a continuación.

Tabla 34. Datos: Ensayos de densidad y absorción de agregado fino para concreto.

PARAMETRO	VALOR		UNIDAD
	ARENA DE RÍO	ARENA DE PEÑA	
Masa de la muestra (S)	500	500	g
Masa del picnómetro+agua (B)	678,05	680,06	g
Masa picnómetro+muestra+agua (C)	993,91	982,68	g
Masa muestra seca (A)	494,58	491,77	g

Las ecuaciones empleadas para determinar la densidad y absorción del agregado fino se exponen en la norma descrita anteriormente y se muestran a continuación:

❖ Densidad aparente

$$D_{s \text{ aparente}} = 0,9975 * A / (B + S - C) \quad (6)$$

Donde:

D = densidad aparente, g/cm³

A = masa en el aire de la muestra secada al horno, gramos

B = masa del picnómetro lleno de agua, gramos

S = masa de la muestra saturada y superficialmente seca

B = masa del picnómetro con la muestra y el agua hasta la marca de calibración, gramos.

❖ Absorción

$$\text{Absorción, \%} = \left[\frac{S-A}{A} \right] * 100 \quad (7)$$

Los resultados correspondientes a las densidades descritas y la absorción se muestran a continuación

Tabla 35. Resultados: Ensayos de densidad y absorción de agregado fino para concreto.

PARAMETRO	VALOR	
	ARENA DE RÍO	ARENA DE PEÑA
Densidad aparente D_{aparente}	2,68	2,49
Absorción (%)	1,10	1,67

➤ **Terrones de arcilla y partículas deleznales**

Para determinar el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales presentes en las muestras de arena de río y arena de peña se siguió el procedimiento descrito en la NTC 589 – “Método de ensayo para determinar el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados”. De acuerdo con la norma, la muestra de ensayo se pone uniformemente en el fondo de un recipiente con agua destilada durante 24 horas. Consecutivamente se toman las partículas de forma individual apretándolas entre el dedo pulgar y el índice para intentar romperlas. Posteriormente se realiza el tamizado en húmedo, se seca la masa obtenida en el horno, se deja enfriar y se determina la masa obtenida.

Figura 53. Procedimiento ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznales de la arena de río. (1) Tamizado de las partículas de agregado, (2) Adición de agua destilada a la muestra y (3) Quebramiento de las partículas de arcilla del agregado.



A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la arena de río. No se presentan los correspondientes a la arena de peña ya que no fue posible reunir la masa mínima de 25 gramos retenida en el tamiz N° 16 establecida en la norma para la realización del ensayo; esto debido a la distribución del tamaño de las partículas.

Tabla 36. Datos: Ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznales del agregado fino.

PARÁMETRO	VALOR	
	ARENA DE RÍO	UNIDAD
Masa muestra inicial (M)	28,75	g
Masa de la muestra seca al horno (R)	27,94	g

La ecuación empleada para determinar el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales, presentada en la norma, se muestra a continuación.

$$P = \frac{(M - R)}{M} \cdot 100 \quad (8)$$

Donde:

M: Masa de la muestra de ensayo.

R: Masa de las partículas retenidas en el tamiz designado luego de eliminar las partículas deleznales y arcillosas.

A partir de la ecuación anterior se obtuvo que el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales para la arena de río fue:

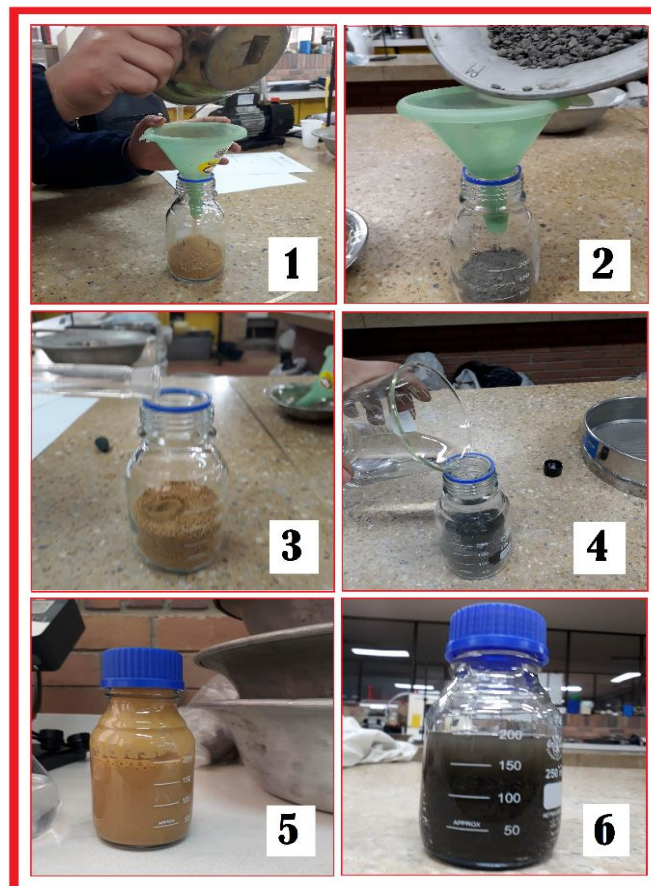
Tabla 37. Resultados: Ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznales en agregados finos.

PARÁMETRO	VALOR
	ARENA DE RÍO
% Terrones de arcilla y partículas deleznales	2,82

➤ **Impurezas orgánicas**

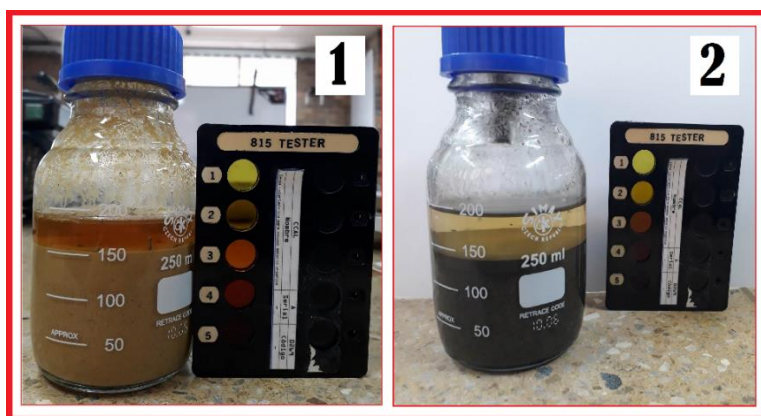
Con el objetivo de determinar de forma aproximada la presencia de impurezas orgánicas que son perjudiciales para el concreto, se realiza el procedimiento descrito en la NTC 127 – “Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto”. El ensayo se inicia llenando una botella con aproximadamente 130 ml de muestra y se añade a esta la solución de hidróxido de sodio hasta lograr un volumen de 200 ml. Se agita la botella y se deja durante 24 horas, tiempo después del cual se puede comparar el color del líquido con el del vidrio de color estándar.

Figura 54. Procedimiento realizado para determinar impurezas orgánicas. **Derecha:** Procedimiento en arena de río. **Izquierda:** Procedimiento en arena de peña. (1) y (2) botella con 130 ml de muestra (3) y (4) vertimiento de ácido clorhídrico (5) y (6) Botella agitada.



Al comparar el color del líquido que contiene la muestra y la solución de ácido clorhídrico con el vidrio de referencia es posible establecer que ninguno de los dos materiales tiene presencia de materia orgánica, ya que los colores obtenidos son igual o más claros que el color estándar de la placa orgánica No. 3. En el caso de la arena de peña, el color obtenido fue el No. 3 y en el caso de la arena de río se obtuvo el color No. 1.

Figura 55. Resultados del ensayo de impurezas orgánicas. (1) Arena de peña (2) Arena de río.



➤ **Solidez o sanidad de los agregados**

Con el fin de determinar la solidez de los agregados cuando son sometidos a los cambios de clima relacionados con su uso en concreto, se realiza el procedimiento descrito en la NTC 126 – “Método de ensayo para determinar la solidez (sanidad) de agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio”. El procedimiento consiste en lavar y secar la muestra, con el fin de separarla en diferentes fracciones y obtener la masa establecida para cada tamaño, según lo descrito en la norma. En el caso de los agregados finos, las fracciones sometidas a ensayo y su masa se presentan a continuación:

Tabla 38. Fracciones y masas empleadas en el ensayo de sanidad de los agregados finos.

ARENA DE RÍO		
Pasa	Retiene	Masa seca inicial (g)
N° 30	N° 50	100
N° 16	N° 30	100
N° 8	N° 16	100
N° 4	N° 8	100
ARENA DE PEÑA		
Pasa	Retiene	Masa seca inicial (g)
N° 30	N° 50	100

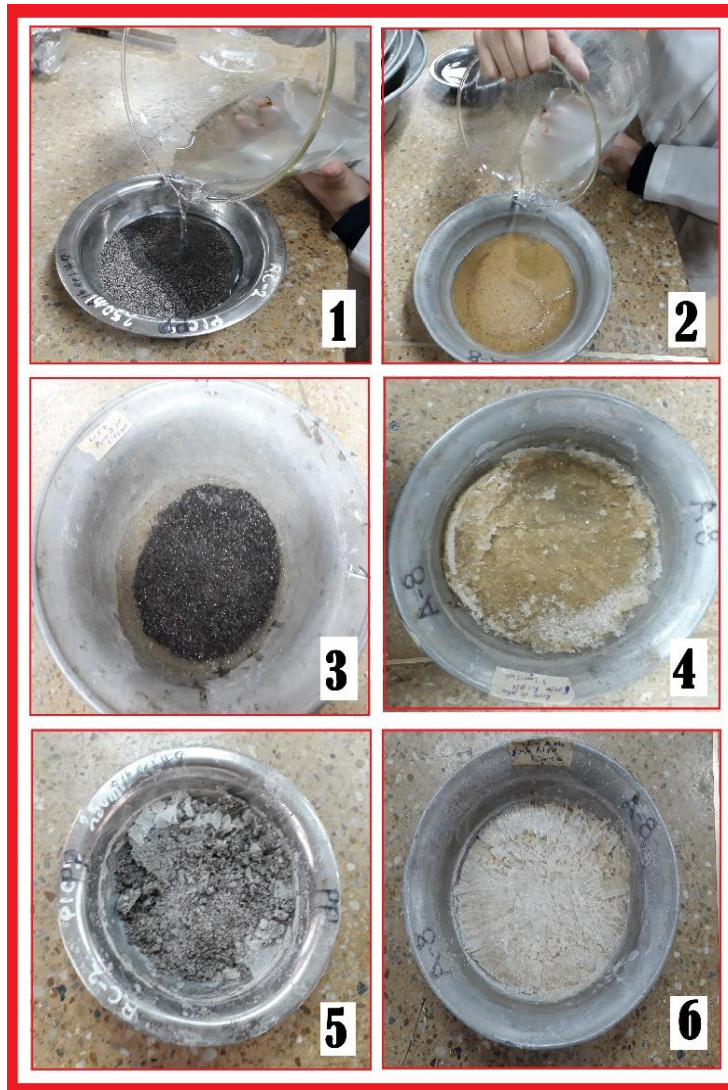
Una vez se tiene la muestra separada por fracciones se sumergen las muestras en la solución de sulfato de sodio preparada previamente de acuerdo con las indicaciones de la norma, por un período entre 16 y 18 horas.

Figura 56. Preparación de la solución de sulfato de sodio para el ensayo de solidez de agregados finos. (1) Masa del sulfato de sodio, 350 g/l (2) Mezcla del sulfato de sodio con el agua a 30°C (3) Verificación de la densidad relativa entre 1,151 y 1,174 (4) Mezcla a 21°C durante 48 horas.



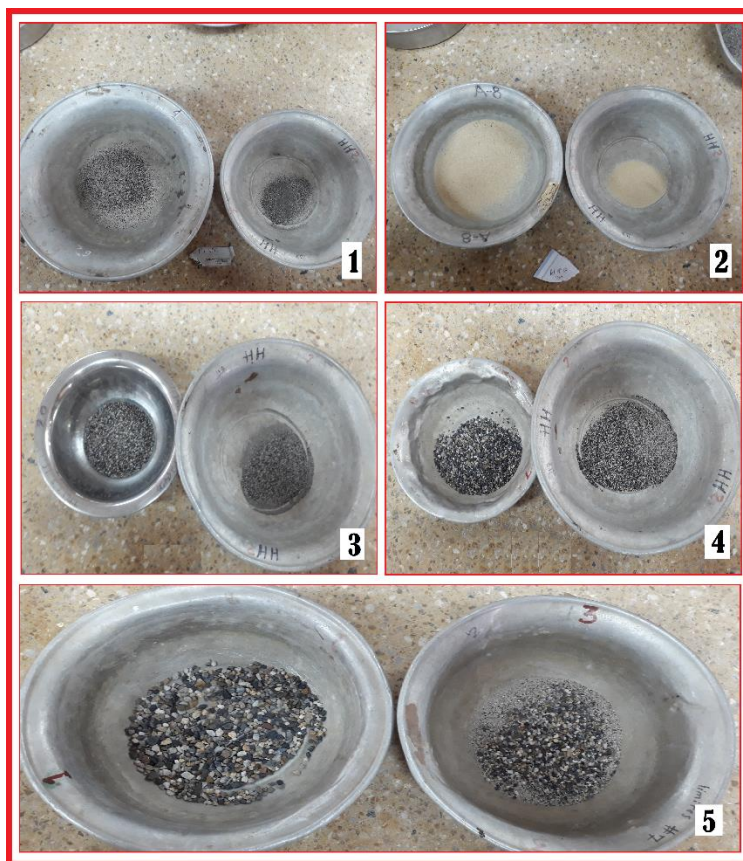
Durante la inmersión se recomienda tapar los recipientes. Luego se retira el agregado de la solución permitiendo que esta drene aproximadamente por 15 minutos, con el objetivo de poner a secar las muestras en el horno hasta lograr masa constante. Posteriormente se deja secar la muestra a temperatura ambiente y se sumerge de nuevo en la solución, repitiendo este ciclo cinco veces. Luego de terminar el ciclo final, se recomienda lavar la muestra de tal forma que quede libre de sulfato de sodio, verificando esto con la reacción que se produzca entre el agua de lavado y el cloruro de bario.

Figura 57. Procedimiento ensayo de sanidad en agregado fino. Derecha: arena de peña retenido en N° 50, Izquierda: arena de río retenido en N° 50. (1) y (2) Muestras en inmersión, (3) y (4) muestras después de drenar la solución por 15 minutos, (5) y (6) muestras secas al horno hasta masa constante.



Para determinar la solidez de los agregados se pesa el material que queda retenido sobre cada tamiz, y la diferencia entre cada valor y la masa inicial de la fracción representa la pérdida en el ensayo.

Figura 58. Agregado fino después de los cinco ciclos de inmersión y secado. En los platones de la derecha se encuentra el material que pasó el tamiz descrito en la norma y en el platón izquierdo el material retenido en el mismo. **1)** Arena de río retiene N° 50. **2)** Arena de peña retiene N° 50. **3)** Arena de río retiene N° 30. **4)** Arena de río retiene N° 16. **5)** Arena de río retiene N° 8.



La masa obtenida luego de eliminar los sulfatos mediante lavado y tamizar en el tamiz establecido se presenta en la tabla 39.

Tabla 39. Masa final obtenida en el ensayo de sanidad para el agregado fino.

ARENA DE RÍO		
PASA	RETIENE	MASA SECA TAMIZADA (g)
N° 30	N° 50	73,69
N° 16	N° 30	40,61
N° 8	N° 16	40,13
N° 4	N° 8	50,6
ARENA DE PEÑA		
PASA	RETIENE	MASA SECA TAMIZADA (g)
N° 30	N° 50	72,95

Entonces, el porcentaje de pérdida promedio para la arena de río es de 49% y para la arena de peña de 27%.

Tabla 40. Pérdida porcentual del ensayo de sanidad en agregados finos.

ARENA DE RÍO		
PASA	RETIENE	PÉRDIDA (%)
N° 30	N° 50	26
N° 16	N° 30	59
N° 8	N° 16	60
N° 4	N° 8	49
% Pérdida ponderado		49
ARENA DE PEÑA		
PASA	RETIENE	PÉRDIDA (%)
N° 30	N° 50	27

10.2.2. Ensayos físicos para concreto de los agregados gruesos

➤ **Granulometría**

De acuerdo al procedimiento descrito en la NTC 77 – “Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos” y en la NTC 78 – “Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 μm en agregados minerales”, se realizó el ensayo de granulometría para el triturado de $\frac{1}{2}$ ” y triturado de $\frac{3}{4}$ ” como se mencionó anteriormente.

Figura 59. Ensayo para determinar por lavado el material que pasa el tamiz N° 200 y ensayo de granulometría. **Izquierda:** Triturado de ½", **Derecha:** Triturado de ¾". (1) y (2) lavado del material de acuerdo a la NTC 78 (3) y (4) Tamizado del material.



La masa seca inicial lavada por el tamiz No 200 se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 41. Masa seca inicial y masa seca lavada por el tamiz No. 200 para gravilla de ½" y gravilla de ¾".

MASA	GRAVILLA ½" (g)	GRAVILLA ¾" (g)
Masa seca inicial	2937,83	2962,21
Masa seca lavada por el tamiz No. 200	2896,68	2945,35

Los resultados obtenidos durante el tamizado de la muestra seca lavada por el tamiz No. 200 se registra a continuación.

Tabla 42. Masa retenida en el ensayo de granulometría para gravilla de ½" y gravilla de ¾".

ABERTURA TAMIZ		PESO RETENIDO (g)	
UNE mm	ASTM N°	GRAVILLA ½"	GRAVILLA ¾"
25	1"	0	47,09
19,5	¾ " (19,05 mm)	15,06	550,24
12,5	½ " (12,7 mm)	584,56	2093,53
9,5	¾ " (9,525 mm)	665,79	143,48
5	N° 4 (4,75 mm)	1437,84	68,11
2,5	N° 8 (2,36 mm)	126,41	2,93
1,25	N° 16 (1,19 mm)	20,5	1,00
0,63	N° 30 (0,59 mm)	9,21	0,53
0,32	N° 50 (0,297 mm)	10,17	0,99
0,16	N° 100 (0,15 mm)	14,39	2,96
0,075	N° 200 (0,075 mm)	13,37	5,46
Fondo		0,56	0,37
Σ		2897,86	2916,69
W finos		41,15	16,86
Error		0,04	0,97

A partir del cálculo de peso retenido corregido, acumulado, el porcentaje retenido acumulado y el porcentaje que pasa es posible construir la curva granulométrica.

Tabla 43. Resultados ensayo de granulometría gravilla de 1/2".

ASTM N°	W _{RETENIDO}	W _{RETENIDO CORREGIDO}	W _{RETENIDO ACUMULADO}	% _{RETENIDO ACUMULADO}	% _{PASA}
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
¾ " (19,05 mm)	15,06	15,05	15,05	0,51	99,49
½ " (12,7 mm)	584,56	584,32	599,38	20,40	79,60
¾ " (9,525 mm)	665,79	665,52	1264,89	43,06	56,94
N° 4 (4,75 mm)	1437,84	1437,25	2702,15	91,98	8,02
N° 8 (2,36 mm)	126,41	126,36	2828,51	96,28	3,72
N° 16 (1,19 mm)	20,50	20,49	2849,00	96,98	3,02
N° 30 (0,59 mm)	9,21	9,21	2858,21	97,29	2,71
N° 50 (0,297 mm)	10,17	10,17	2868,37	97,64	2,36
N° 100 (0,15 mm)	14,39	14,38	2882,76	98,13	1,87
N° 200 (0,075 mm)	13,37	13,36	2896,12	98,58	1,42
Fondo	0,56	0,56	2937,83	100,00	0,00
	2897,86	2896,68			

- Curva granulométrica

Gráfico 3. Curva granulométrica del triturado de 1/2"

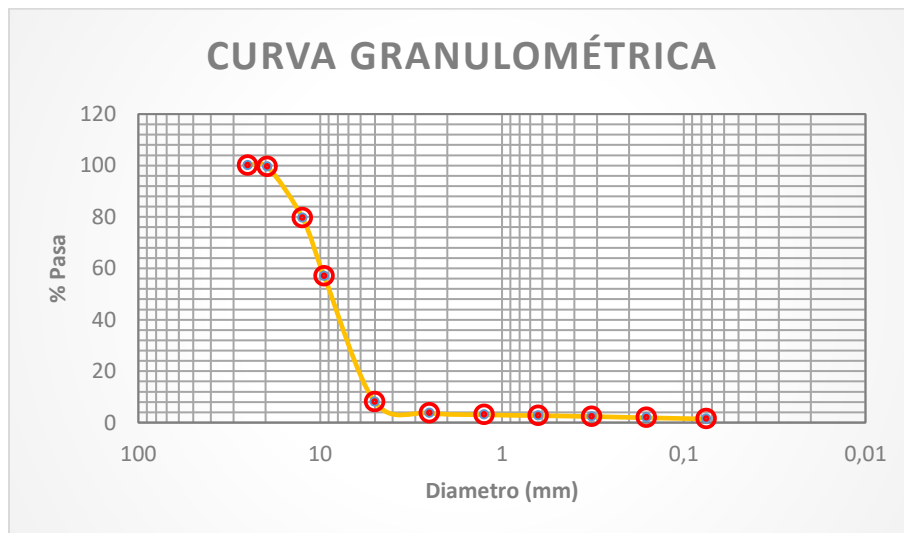
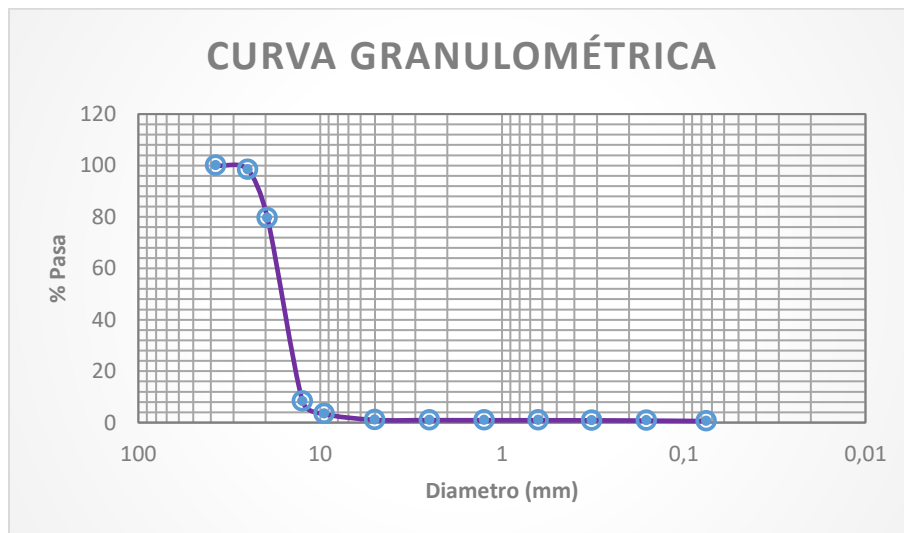


Tabla 44. Resultados ensayo de granulometría gravilla de 3/4".

ASTM N°	W _{RETENIDO}	W _{RETENIDO CORREGIDO}	W _{RETENIDO ACUMULADO}	% _{RETENIDO ACUMULADO}	% _{PASA}
1 1/2"	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	47,09	47,55	47,55	1,61	98,39
3/4 " (19,05 mm)	550,24	555,65	603,20	20,36	79,64
1/2 " (12,7 mm)	2093,53	2114,10	2717,30	91,73	8,27
3/8 " (9,525 mm)	143,48	144,89	2862,19	96,62	3,38
N° 4 (4,75 mm)	68,11	68,78	2930,97	98,95	1,05
N° 8 (2,36 mm)	2,93	2,96	2933,93	99,05	0,95
N° 16 (1,19 mm)	1,00	1,01	2934,94	99,08	0,92
N° 30 (0,59 mm)	0,53	0,54	2935,47	99,10	0,90
N° 50 (0,297 mm)	0,99	1,00	2936,47	99,13	0,87
N° 100 (0,15 mm)	2,96	2,99	2939,46	99,23	0,77
N° 200 (0,075 mm)	5,46	5,51	2944,98	99,42	0,58
Fondo	0,37	0,37	2962,21	100,00	0,00
	2916,69	2945,350			

- *Curva granulométrica*

Gráfico 4. *Curva granulométrica del triturado de ¾"*



➤ **Densidad y absorción**

Con el fin de obtener la densidad y absorción del triturado de ½" y ¾" se efectuó el procedimiento descrito en la NTC 176 – “Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso”. Para ello, se debe sumergir en agua la masa seca durante 24 h con el fin de saturar los poros hasta llevarla a la condición superficialmente seca SSS. Posteriormente se seca la superficie de las partículas y se determina su masa. Para que el material alcance este estado, se debe remover la muestra en el agua y se envuelve en un paño absorbente hasta que se elimine el agua superficial. Luego se coloca la muestra saturada y superficialmente seca en un recipiente sumergido en agua a una profundidad suficiente para determinar su masa en agua. Finalmente se seca la muestra y se determina su masa.

Figura 60. Procedimiento del ensayo de densidad y absorción de agregados gruesos. (1) y (2) Triturado de 1/2" y 3/4" en estado saturado, (3) y (4) Triturado de 1/2" y 3/4" en estado SSS (Saturado y superficialmente seco).



A continuación, se presentan los valores obtenidos de los agregados gruesos:

Tabla 45. Datos: Ensayos de densidad y absorción del agregado grueso para concreto.

PARAMETRO	VALOR		UNIDAD
	GRAVILLA 1/2"	GRAVILLA 3/4"	
W _{inicial}	2500,58	3500,84	g
W _{SSS(aire) (B)}	2444,48	3481,34	g
W _{SSS(agua) (C)}	1502	2136,1	g
W _{SSS(seco) (A)}	2390,26	3421,68	g

Para determinar los parámetros de densidad aparente, aparente SSS, nominal y el porcentaje de absorción, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$\text{❖ Densidad aparente } \rightarrow D_{bulk} = 0.9975 \cdot A / (B - C) \quad (9)$$

A: Masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno (g)

B: Masa en el aire de la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca (g)

C: Masa en el agua de la muestra de ensayo saturada (g)

Los resultados de este ensayo se presentan a continuación

Tabla 46. Resultados: Ensayos de densidad y absorción del agregado grueso para concreto.

PARAMETRO	VALOR	
	GRAVILLA 1/2"	GRAVILLA 3/4"
Densidad aparente D_{bulk}	2,53	2,54
% Absorción	2,27	1,74

➤ **Terrones de arcilla y partículas deleznales**

Con el fin de determinar el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales presentes en las gravillas objeto de esta investigación, se realizó la metodología propuesta en la NTC 589, tal como se describió anteriormente, teniendo en cuenta que, en el caso de los agregados gruesos, se recomienda separar la muestra en diferentes tamaños usando los tamices 4,75 mm; 9,5 mm; 19,0 mm y 37,5 mm.

Figura 61. Procedimiento ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznable del agregado grueso. **(A)** Triturado de $\frac{1}{2}$ ", **(B)** Triturado de $\frac{3}{4}$ ", **(1)** y **(2)** Adición de agua destilada a las fracciones entre No 4 – $\frac{3}{8}$ " y entre $\frac{3}{8}$ " – $\frac{3}{4}$ ", **(3)** y **(4)** Quebramiento de los terrones de arcilla de las fracciones entre No 4 – $\frac{3}{8}$ " y entre $\frac{3}{8}$ " – $\frac{3}{4}$ ", **(5)** y **(6)** Adición de agua destilada a las fracciones entre $\frac{3}{8}$ " – $\frac{3}{4}$ " y entre $\frac{3}{4}$ " y $1 \frac{1}{2}$ ", **(7)** y **(8)** Quebramiento de los terrones de arcilla de las fracciones entre $\frac{3}{8}$ " – $\frac{3}{4}$ " y entre $\frac{3}{4}$ " y $1 \frac{1}{2}$ ".



De acuerdo con lo anterior, se presenta la muestra seleccionada para el ensayo y la masa retenida en los diferentes tamices.

Tabla 47. Datos: Ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznales del agregado grueso.

AGREGADO	TAMICES	MASA MUESTRA INICIAL (1)	MASA MUESTRA SECA (2)	UNIDAD
Gravilla ½"	No. 4 - 3/8"	1872,94	1862,57	g
	3/8" - 3/4"	2453,89	2446,1	g
Gravilla ¾"	3/8" - 3/4"	2606,43	2592,67	g
	3/4" - 1 1/2"	3419,28	3410,9	g

Para determinar el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales del agregado grueso se emplea, al igual que en los finos, la ecuación 8. Es importante mencionar que en el caso de los agregados gruesos el resultado corresponde a la ponderación de los dos porcentajes obtenidos para cada fracción de tamices del agregado. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 48. Resultados: Ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznales del agregado grueso.

AGREGADO	TAMICES	% PARTÍCULAS DELEZNABLES	% PARTÍCULAS DELEZNABLES PONDERADO
Gravilla ½"	No. 4 - 3/8"	0,554	0,42
	3/8" - 3/4"	0,317	
Gravilla ¾"	No. 4 - 3/8"	0,528	0,37
	3/8" - 3/4"	0,245	

➤ **Partículas planas y alargadas**

Con el fin de determinar la forma de las partículas de agregado grueso ya sea triturado de ½" y triturado de ¾" se efectuó el procedimiento descrito en la NTC 6043 denominado "Método de ensayo para determinar el porcentaje de partículas planas y alargadas o partículas planas y alargadas en agregado grueso". Para realizar este ensayo, inicialmente se tomó la masa de agregado seco y se distribuyó en tres fracciones, reduciendo de esta manera cada fracción en una cantidad de 10% o más de la muestra original, hasta obtener aproximadamente 100 partículas para cada fracción de tamaño requerida. Posteriormente, cada una de las partículas de cada fracción de tamaño se agruparon en dos grupos: (1) Partículas planas, (2) Partículas alargadas empleando los siguientes equipos:

Figura 62. Equipo empleado para ensayo de partículas planas y alargadas (1) Dispositivo de calibración proporcional (2) Calibrador de espesores



Para determinar las partículas planas se tomó cada fracción y se ajustó la abertura más grande del calibrador de espesores, igual al ancho máximo de la partícula. En donde se establece que la partícula era plana si el espesor máximo pasa a través de la abertura más pequeña. Las fracciones que se utilizaron para cada tipo de agregado de muestran a continuación:

Tabla 49. Fracciones de cada tipo de agregado. Ensayo de partículas planas y alargadas

Triturado de 1/2"		Triturado de 3/4"	
Pasa	Retiene	Pasa	Retiene
3/4"	1/2"	1"	3/4"
1/2"	3/8"	3/4"	1/2"
3/8"	1/4"	1/2"	3/8"

Por su parte, para determinar las partículas alargadas se ajustó la abertura más grande del dispositivo de calibración proporcional, igual al largo máximo de la partícula. Se establece que la partícula es alargada si el espesor máximo no atraviesa la abertura de la fracción respectiva.

Finalmente se determinó la masa de cada fracción de partículas planas y alargadas. El procedimiento descrito se muestra a continuación:

Figura 63. Procedimiento del ensayo de partículas planas y alargadas del agregado grueso (triturado de 1/2" y 3/4" (1) Partículas planas (2) Partículas alargadas



A continuación, se presenta la masa seca inicial de cada fracción para cada tipo de agregado.

Tabla 50. Datos de masa seca inicial de cada fracción (Para triturado de 1/2" y 3/4")

MASA PASA	MASA RETIENE	VALOR		UNIDAD
		TRITURADO 3/4"	TRITURADO 1/2"	
1"	3/4"	280,88	-	g
3/4"	1/2"	701,29	161,69	g
1/2"	3/8"	19,53	88,65	g
3/8"	1/4"	-	244,85	g

- Partículas planas

La masa y el porcentaje de partículas planas para cada tipo de agregado se presentan a continuación

Tabla 51. Resultado de masas y porcentaje de partículas aplanadas ((Para triturado de 1/2" y 3/4")

PARTICULAS APLANADAS					
PASAS	RETIENE	TRITURADO 3/4"		TRITURADO 1/2"	
		MASA (g)	PORCENTAJE (%)	MASA (g)	PORCENTAJE (%)
1"	3/4"	43,37	15	-	-
3/4"	1/2"	44,42	6	35,74	22
1/2"	3/8"	0	0	11,7	13
3/8"	1/4"	-	-	38,62	16

- **Partículas alargadas**

A continuación, se presenta la masa y el porcentaje de partículas alargada para cada tipo de agregado

Tabla 52. Resultado de masas y porcentaje de partículas alargadas ((Para triturado de 1/2" y 3/4")

PARTICULAS ALARGADAS					
PASA	RETIENE	TRITURADO 3/4"		TRITURADO 1/2"	
		MASA (g)	PORCENTAJE (%)	MASA (g)	PORCENTAJE (%)
1"	3/4"	0	0	-	-
3/4"	1/2"	200,43	29	0	0
1/2"	3/8"	3,83	20	21,87	25
3/8"	1/4"	-	-	79,34	32

➤ **Solidez o sanidad de los agregados**

La solidez del triturado de 1/2" y 3/4" se determina siguiendo el procedimiento descrito anteriormente para agregados finos, según la NTC 126 – “Método de ensayo para determinar la solidez (sanidad) de agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio”, De acuerdo con este, las fracciones en las cuales se separó la muestra se observan a continuación.

Tabla 53. Fracciones y masas empleadas en el ensayo de sanidad de los agregados gruesos.

TRITURADO DE 1/2"		
Pasa	Retiene	Masa seca (g)
3/8"	N° 4	300,86
3/4"	3/8"	1000,45
TRITURADO DE 3/4"		
Pasa	Retiene	Masa seca (g)
3/4"	1/2"	674,01
1 1/2"	3/4"	1507,15

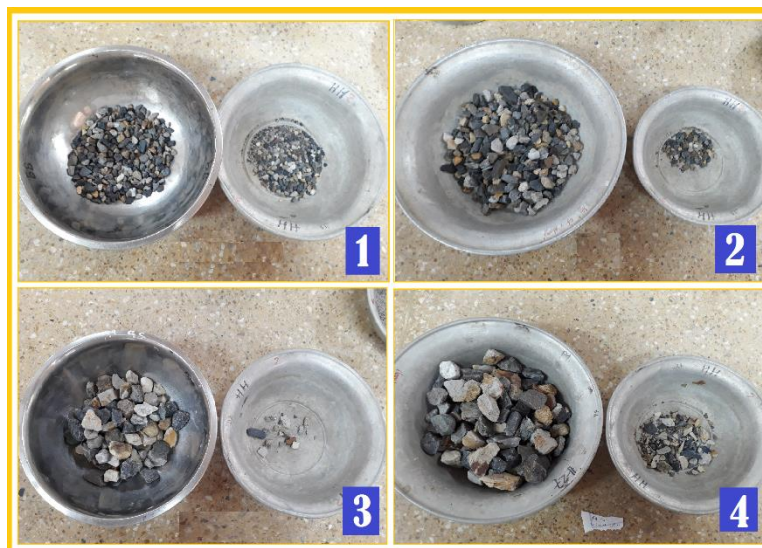
El proceso continúa de igual forma al descrito en los ensayos de agregados finos, se realiza la inmersión y se seca la muestra, realizando cinco ciclos y verificando la ausencia de sulfato de sodio luego de lavarla.

Figura 64. Procedimiento ensayo de sanidad en agregado grueso. Derecha: triturado de 1/2" retenido en N° 4, Izquierda: triturado de 3/4" retenido en 1/2" (1) y (2) Muestras en inmersión, (3) y (4) muestras después de drenar la solución por 15 minutos, (5) y (6) muestras secas al horno hasta masa constante.



Los procesos de inmersión se deben repetir cinco veces de acuerdo con lo establecido en la norma, para determinar posteriormente la masa perdida.

Figura 65. Agregado grueso después de los cinco ciclos de inmersión y secado. En los platones de la derecha se encuentra el material que pasó el tamiz descrito en la norma y en el platón izquierdo el material retenido en el mismo. 1) Triturado de 1/2" retiene N° 4. 2) Triturado de 1/2" retiene 3/8". 3) Triturado de 3/4" retiene 1/2". 4) Triturado de 3/4" retiene 3/4".



La masa obtenida luego de eliminar los sulfatos mediante lavado y tamizar en el tamiz establecido se presenta en la tabla 54.

Tabla 54. Masa final obtenida en el ensayo de sanidad para el agregado fino.

TRITURADO DE 1/2"		
PASA	RETIENE	MASA SECA TAMIZADA (g)
3/8"	N° 4	231,96
3/4"	3/8"	874,58
TRITURADO DE 3/4"		
PASA	RETIENE	MASA SECA TAMIZADA (g)
3/4"	1/2"	611,39
1 1/2"	3/4"	1387,61

Entonces, el porcentaje de pérdida promedio para el triturado de 1/2" es de 18% y para el triturado de 3/4" de 9%.

Tabla 55. Pérdida porcentual del ensayo de sanidad en agregados finos.

TRITURADO DE 1/2"		
PASA	RETIENE	PÉRDIDA (%)
3/8"	N° 4	23
3/4"	3/8"	13
% Pérdida ponderado		18
TRITURADO DE 3/4"		
PASA	PASA	PASA
3/4"	3/4"	9
1 1/2"	1 1/2"	8
% Pérdida ponderado		9

Inspección cualitativa

La NTC 126 recomienda que para este ensayo se realice una inspección cualitativa a muestras más gruesas que 3/4". Para este caso se realizará una inspección a muestras con tamaños que varían de No. 4 a 3/4", debido a que se busca determinar si existe evidencia de ruptura excesiva. En la tabla 56 y 57 se observan los resultados obtenidos de las partículas que contienen erosión:

Tabla 56. Inspección cualitativa del triturado de 1/2" NTC 126











Análisis cualitativo de 1/2"											
Tamaño de tamiz	Partículas que contiene erosión										N° Total de partículas antes del ensayo
	Desintegración		Resquebrajamiento		Desmoronamiento		Agrietamiento		Descascaramiento		
	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%	
Retiene N°4	9	0.98	45	4.89	0	0	5	0.54	33	3.59	920
											
Retiene 3/8"	25	5.21	69	14.38	9	0.98	27	2.93	29	6.04	480
											

Tabla 57. Inspección cualitativa del triturado de 3/4" NTC 126

Análisis cualitativo de 3/4"											
Tamaño de tamiz	Partículas que contiene erosión										N° Total de partículas antes del ensayo
	Desintegración		Resquebrajamiento		Desmoronamiento		Agrietamiento		Descascaramiento		
	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%	
Retiene 1/2"	8	7.14	20	17.86	3	2.68	4	3.57	16	14.29	112
											
Retiene 3/4"	12	12.90	31	33.33	2	2.15	16	17.20	9	9.68	93
											

➤ ***Desgaste de los agregados en la máquina de los Ángeles***

Teniendo en cuenta el procedimiento descrito en la NTC 98 “Determinación de la resistencia al desgaste de agregados gruesos hasta 37.5 mm, utilizando la máquina de los ángeles” es posible determinar el porcentaje de desgaste a la abrasión de los agregados. Para ello, la norma establece una gradación tipo A, B, C, D que corresponde a la masa que se debe emplear para el ensayo de acuerdo a la gradación obtenida en el análisis granulométrico. Una vez se tenga la cantidad suficiente de material, se debe elegir una carga correspondiente a esferas de acero con un diámetro promedio de 46.8 mm y una masa entre 390 y 445 g, que tienen la función de desgastar las partículas del agregado. Se debe introducir la muestra seca y la carga abrasiva en la máquina de los ángeles poniéndola a girar hasta lograr 500 vueltas a una velocidad entre 30 y 33 rpm. Luego de producir agitación se hace pasar la muestra por el tamiz No. 12 y se lava por el mismo, para finalmente secarla hasta obtener peso constante y determinar su masa, como se observa en la figura 66.

Figura 66. Procedimiento ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles de los agregados grueso. (1) Máquina de los Ángeles, (2) y (3) Triturado de $\frac{1}{2}$ " y de $\frac{3}{4}$ " luego de agitación mecánica dentro de la máquina de los ángeles, (4) y (5) Triturado de $\frac{1}{2}$ " y de $\frac{3}{4}$ " luego de agitación, fuera de la máquina de los ángeles y (6) y (7) Tamizado del triturado de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " por el tamiz No. 12.



Los parámetros como la masa seca inicial, el tipo de granulometría y el número de esferas, son con los cuales se inicia el ensayo de desgaste para el agregado grueso como se presentan a continuación:

Tabla 58. Parámetros iniciales para el ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles del triturado de 1/2" y de 3/4"

PARAMETRO	TRITURADO 1/2"	TRITURADO 3/4"
Masa inicial seca (g)	2727,86	2505,37
Granulometría	Tipo B	Tipo A
Cantidad de Esferas	6	6

La masa seca obtenida luego de lavarla por el tamiz No.12 se presenta en la tabla 59

Tabla 59. Masa seca lavada por el tamiz No.12 de los agregados grueso

MASA SECA FINAL (g)	
Triturado de 1/2"	1939,23
Triturado de 3/4"	1797,74

El porcentaje de desgaste del agregado grueso se determina con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P1 - P2}{P1} * 100 \quad (10)$$

Donde;

P1 = Masa de la muestra seca antes del ensayo, y

P2 = Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz No. 12

Los resultados obtenidos del triturado de 1/2" y 3/4" son:

Tabla 60. Porcentaje de desgaste del triturado de 1/2" y 3/4"

PORCENTAJE DE DESGASTE (%)	
Triturado de 1/2"	29
Triturado de 3/4"	28

10.2.3. Ensayos físicos para filtros

➤ Granulometría

Basados en el procedimiento descrito en la NTC 77, como se mencionó anteriormente, se obtuvo la curva granulométrica de la arena de río y arena de peña, teniendo en cuenta los resultados presentados en los ensayos físicos para concreto. Posteriormente se determinó el tamaño efectivo (Te) y el coeficiente de uniformidad (Cu) de las partículas, parámetro elemental para la verificación de estos agregados en el concreto, mediante las siguientes ecuaciones.

$$Te = D_{10} \quad (11)$$

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (12)$$

Donde;

D_{10} , corresponde al diámetro de la abertura del tamiz por el cual pasa el 10% del material

D_{60} , diámetro de la abertura del tamiz por el cual pasa el 60% del material.

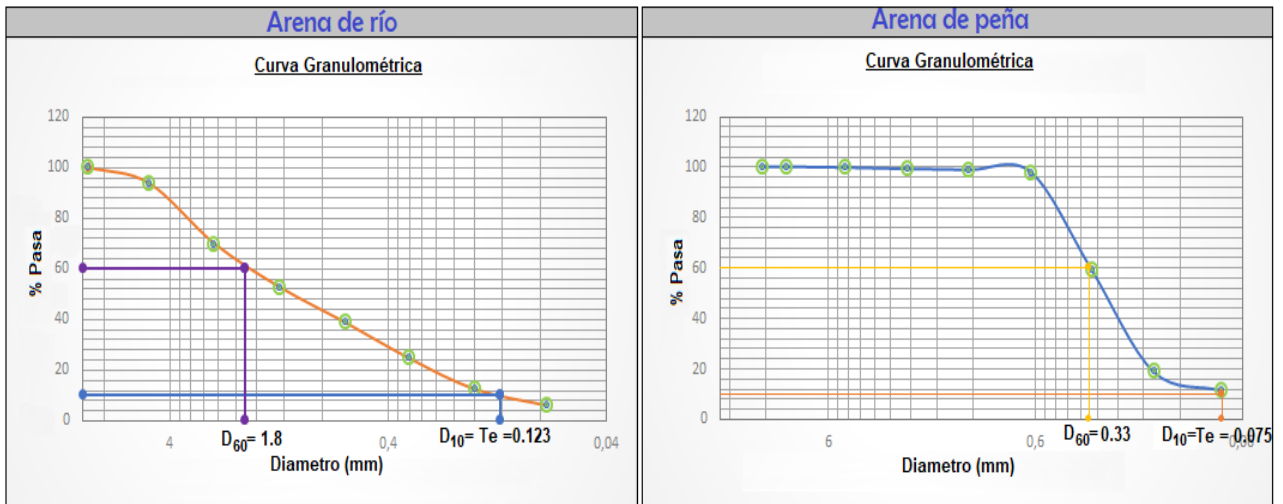
Los resultados obtenidos de estos parámetros se muestran en la tabla 61:

Tabla 61. Parámetros Te y Cu de los agregados finos para filtros

PARÁMETRO	ARENA DE RÍO	ARENA DE PEÑA
Te	0,12	0,075
Cu	14,63	4,4

Las curvas granulométricas obtenidas para cada tipo de agregado fino y con los parámetros D_{10} y D_{60} , para determinar el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad se muestran en la figura 67.

Figura 67. Curvas granulométricas de los agregados finos para filtros



➤ **Porosidad**

Siguiendo el procedimiento del método de Baylis descrito por Jorge Arboleda en su libro Teoría y práctica de la purificación del agua, es posible determinar la porosidad del medio filtrante. Para ello es necesario colocar suficiente material seco en un tubo de plástico o de vidrio de 2" de diámetro como para que alcance una altura de 60 cm, se toma su masa y se inicia un proceso de lavado con flujo ascendente hasta lograr una expansión del 50%.

La masa con la cual se inician los ensayos para las arenas que son sujeto de esta investigación se presentan a continuación.

Tabla 62. Masa inicial seca para el ensayo de porosidad de la arena de río y la arena de peña.

MASA INICIAL SECA (g)	
Arena de río	799
Arena de peña	669,49

Una vez se observa este fenómeno se suspende el flujo dejando que las partículas se asienten lentamente. Luego se marca el nivel al que queda la arena, se retira el material del tubo y se añade agua hasta la marca con el fin de medir este volumen. Seguidamente se muestra el montaje y el proceso realizados para la arena de río y la arena de peña.

Figura 68. Ensayo de porosidad en el agregado fino. **1)** y **2)** Arena de río, montaje y expansión respectivamente **3)** y **4)** Arena de peña, montaje y expansión respectivamente.



Finalmente, para determinar la porosidad de la muestra se emplea la siguiente ecuación.

$$P = \frac{\text{Volumen de vacíos}}{\text{Volumen de la muestra}} \times 100 \quad (13)$$

Es importante tener en cuenta que el volumen de vacíos se determina por la diferencia entre el volumen de agua medido y el volumen de la muestra, siendo esta última la masa sobre la densidad de la muestra.

Los resultados obtenidos para las arenas se muestran a continuación.

Tabla 63. Resultados del ensayo de porosidad para agregados finos.

DATOS	ARENA DE RÍO	ARENA DE PEÑA
Volumen de la muestra (cm ³)	298,23	269,38
Volumen de vacíos (ml)	221,77	240,62
Porosidad (%)	74	89

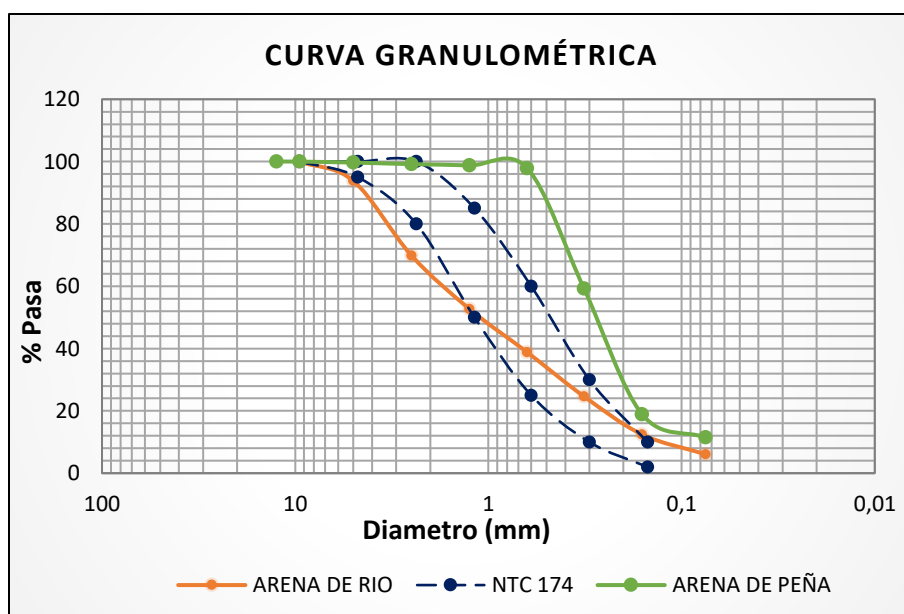
11. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COMPARACIÓN CON ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

11.1. COMPORTAMIENTO DE LOS AGREGADOS EN EL CONCRETO

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, es posible identificar el comportamiento que tendrán los agregados en el concreto. Respecto a la curva granulométrica obtenida mediante el ensayo de tamizado se identificó que los agregados finos presentan gradación deficiente mientras que los agregados gruesos muestran una gradación adecuada que cumple con las recomendaciones establecidas en la NTC 174.

Como se observa en el gráfico 5, la curva granulométrica de la arena de río y arena de peña no se encuentra dentro de los límites granulométricos señalados. Por su parte, la arena de peña tiene un exceso de los tamaños N° 16 al N° 100 y la arena de río presenta una deficiencia en el diámetro de partículas N° 8, lo que indica que la trabajabilidad, la porosidad y la durabilidad del concreto no serán las óptimas (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). Además, estos agregados no presentan una amplia variedad de tamaños lo que impediría obtener los mejores resultados para el concreto en su estado fresco (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003).

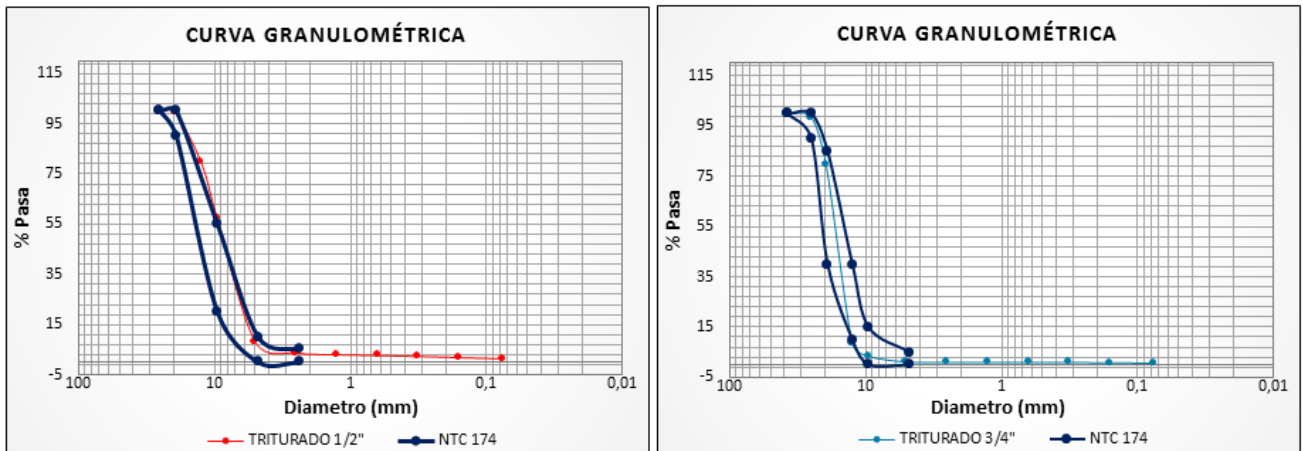
Gráfico 5. Comparación curva granulométrica de la Arena de río y Arena de peña con especificación NTC 174



Esta información se puede verificar con los resultados obtenidos del reconocimiento macroscópico, dado que, en el caso de la arena de peña, esta presenta una selección media a alta, lo que señala que existe similitud en los tamaños de las partículas del agregado. En contraste, la arena de río dispone de una diversidad de tamaños que se ajusta a las observaciones realizadas, que varía de 0.04 mm a 9 mm de diámetro corroborando su inapropiada selección.

En el gráfico 6 se exponen las curvas granulométricas de los triturados de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " bajo el rango de las especificaciones de la misma norma; se identifica así, que los tamaños de las partículas de los agregados son convenientes para su utilización en el concreto. Esto está relacionado con la distribución de sus tamaños, que de acuerdo con los ensayos macroscópicos presentan una mala selección, es decir, son bien gradados. Es fundamental tener en cuenta que la gradación del material determina las proporciones de la mezcla y por esta razón se recomienda que los agregados estén bien gradados, ya que de esta forma las partículas pequeñas ocuparan los espacios existentes entre las de mayor tamaño, lo que disminuye la cantidad de vacíos y la cantidad de agua más cemento que se requiere (Rivera, 2013).

Gráfico 6. Comparación curva granulométrica del triturado de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " con especificación NTC 174



El tamaño máximo de los agregados es de 1" para el triturado de $\frac{1}{2}$ " y de 1 $\frac{1}{2}$ " para el triturado de $\frac{3}{4}$ ", lo que indica que para el caso del agregado de $\frac{3}{4}$ " se requiere de menor cantidad de agua y cemento en comparación al agregado de $\frac{1}{2}$ ", ya que tiene menor área superficial. De igual forma, según Chan Yam, Solís Carcaño y Moreno en 2003, el agregado de $\frac{1}{2}$ " tendrá menor resistencia que el otro tipo de triturado debido a que el tamaño máximo de sus partículas es menor.

Según el reconocimiento macroscópico, la forma de los agregados que incluye aspectos como el redondeamiento de los granos, se obtuvo que la arena de río, el triturado de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " presentan una redondez subredondeada a redondeada, lo que

señala que estos agregados requieren de menor cantidad de agua para obtener una trabajabilidad del concreto acertada. Con respecto a la arena de peña la cual tiene una redondez subredondeada a subangular, es posible establecer que requiere mayor cantidad de agua para la mezcla en comparación a los anteriores, no obstante, mejora la adherencia entre el cemento y los agregados aumentando así la resistencia a la flexión y la compresión del concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos del ensayo de partículas planas y alargadas en ambos triturados, es posible determinar que presentan un porcentaje mayor al recomendado que es del 15%, lo que significa que estos agregados producirán concretos de una calidad insuficiente debido a su fragilidad (Quiroz, Salamanca, & Antezana, 2006).

Otro de los aspectos que influyen en el concreto es la absorción, para la cual se recomienda que su valor sea menor a 3% en agregado gruesos y menor a 5% en agregados finos (Quiroz, Salamanca, & Antezana, 2006). De acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo de absorción, los agregados sujetos de esta investigación presentan una absorción de 1.10% para la arena de río, de 1.67 % para la arena de peña, de 2.27% para el triturado de 1/2" y de 1.74% para el triturado de 3/4". Estos valores son favorables para el concreto ya que mejoran la manejabilidad del mismo en estado fresco y su resistencia a procesos de congelamiento (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003).

Con referencia a la densidad de los agregados se obtuvieron valores de 2.68 para la arena de río, 2.49 para la arena de peña, 2.53 para el triturado de 1/2" y 2.54 para el triturado de 3/4", los cuales cumplen con lo recomendado por Chan J., et al en 2003, que indica que este parámetro debe ser igual o superior a 2.25, debido a que una mayor densidad genera una mejor resistencia a la compresión del concreto.

Un parámetro en el que se obtuvieron valores favorables relacionados con los agregados fino y grueso fue en el ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznable, ya que los valores fueron de 2.82% para la arena de río, de 0.42% para el triturado de 1/2" y de 0.37% para el triturado de 3/4"; los cuales cumplen con lo recomendado en la NTC 174 que indica un valor máximos de 3% para agregado fino y entre 2% a 10% para agregado grueso teniendo en cuenta el tipo de construcción y la región pluviométrica. El bajo porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznable encontrados garantiza que no exista un incremento en la demanda de agua para la mezcla, evita erupciones en el concreto en estado endurecido, mejorando su durabilidad y resistencia al desgaste (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). Es importante resaltar que no fue posible realizar el ensayo a la arena de peña, debido a que los tamaños de las partículas

de este agregado eran inferiores al recomendado en la NTC 589, por lo cual no fue posible reunir la masa mínima.

Para determinar la resistencia de los agregados ante los cambios de los agentes ambientales, se llevó a cabo el ensayo de sanidad de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio, obteniéndose para la arena de río un porcentaje promedio de 49%, para la arena de peña de 27%, para el triturado de $\frac{1}{2}$ " de 18% y para el triturado de $\frac{3}{4}$ " un porcentaje promedio de 9%. Teniendo en cuenta los límites establecidos en la NTC 174, que corresponden a 10% para el agregado fino y 12% para el agregado grueso, se comprueba que solamente el triturado de $\frac{3}{4}$ " cumple con las características para soportar los efectos producidos por el intemperismo. Se identificó que los agregados finos y el triturado de $\frac{1}{2}$ " no cumplen con las especificaciones recomendadas para su uso en concreto, no obstante, es importante mencionar que el porcentaje de pérdida obtenido en el triturado de $\frac{1}{2}$ " está cerca de cumplir con las recomendaciones, mientras que los agregados finos presentan una resistencia demasiado baja ante los fenómenos atmosféricos.

La inspección cualitativa obtenida de este ensayo muestra que tanto el triturado de $\frac{1}{2}$ " como el de $\frac{3}{4}$ " presentan más resquebrajamiento en sus partículas con porcentajes de 4.89% y 14.38% para el triturado de $\frac{1}{2}$ " y de 17.86% y 33.33% para el triturado de $\frac{3}{4}$ ", seguido del deterioro por descascaramiento en porcentajes de 3.59% y 6.04% para el triturado de $\frac{1}{2}$ "; y de 14.29% y 9.68% para el triturado de $\frac{3}{4}$ ", lo que representa el inicio de daños más severos como grietas o desintegración. Esta observación verifica los resultados obtenidos en la inspección cuantitativa, debido a que muchas de las partículas del agregado grueso no demostraban ningún tipo de daño visible a simple vista.

Finalmente, para realizar un estudio más completo de las aptitudes de los agregados sujetos de la investigación para ser empleados en concreto se realizaron ensayos exclusivos para el agregado fino y para el grueso.

En el caso del agregado fino se ejecutó el ensayo de impurezas orgánicas a partir del cual se obtuvo una placa orgánica de 1 para la arena de río y de 3 para la arena de peña, según el vidrio de color estándar empleado. Los resultados muestran que los agregados no tienen compuestos orgánicos perjudiciales para su uso en el concreto, ya que el color alcanzado es igual o inferior al estándar (3) (NTC 127, 2000). Dentro de este orden de ideas es posible afirmar que utilizar estos agregados en construcciones de concreto es conveniente, puesto que la ausencia de materia orgánica puede disminuir el deterioro y aumentar la durabilidad y resistencia del mismo (Rivera G. , 2013).

Para el caso de los agregados gruesos se llevó a cabo el ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles, a partir del cual se obtuvieron resultados de 28% para el triturado de $\frac{3}{4}$ " y de 29% para el triturado de $\frac{1}{2}$ ". Los valores obtenidos indican que la calidad de los agregados gruesos es sobresaliente al ser sometido a altas cargas ya que se encuentran dentro del máximo límite indicado que es del 40% (Rivera G. , 2013).

Con objeto de efectuar un análisis más profundo de los agregados, se realiza un estudio de la reacción álcali agregado, que es la propiedad química que más se destaca en su uso para el concreto por las consecuencias adversas que tiene en el mismo. En este orden de ideas, se empleó el ensayo macroscópico de reconocimiento, el ensayo petrográfico y difracción de rayos x. Cada uno de ellos cuenta con un distinto nivel de detalle; por su parte, el reconocimiento macroscópico permite identificar algunos minerales que contiene el agregado con ayuda del estereoscopio; Sin embargo, los resultados obtenidos empleando este equipo no son lo suficientemente verídicos, por lo cual se emplea el ensayo petrográfico y la difracción de rayos x, que permiten identificar con mayor grado de certeza la composición mineralógica de los agregados.

Respecto a la arena de río, el reconocimiento macroscópico indica que este agregado presenta bastante contenido de cuarzo, así como fragmentos de roca y filosilicatos como moscovita y biotita, además, el porcentaje de partículas resistentes a la meteorización es decir el cuarzo, es del 68%, mientras que las partículas fácilmente alterables como fragmentos de roca, micas y calcita es del 32%. De igual manera, el análisis petrográfico señala la presencia de granos de origen ígneo constituidos por anfíboles, cuarzo, biotita y cuarzo microcristalino con extinción ondulante; de origen sedimentario compuesto principalmente por granos de cuarzo y de origen metamórfico formado por un esquisto compuesto por cuarzo, moscovita y biotita. También se identificaron otros minerales como plagioclasa, feldespato potásico, piroxenos, circones y cuarzos bastante fracturados en una cantidad poco representativa. La difracción de rayos x determinó que este agregado se encuentra constituido por cuarzo en alto contenido, por albita (Plagioclasa sódica) en cantidades medias, actinolita, apatita y biotita en bajos porcentajes, además de trazas de caolinita.

A partir de los resultados, es posible establecer de forma general que este agregado está constituido primordialmente por cuarzo, esto representa que la arena de río ha resistido a procesos de transporte intensos. Sin embargo, estos procesos generaron pequeñas cantidades de cuarzos fracturados como se mencionó anteriormente, y que podrían ocasionar debilitamientos estructurales (Angel Martínez, y otros, 1996), así como ser reactivos a los álcalis del cemento ya que ciertas formas del cuarzo con características físicas como cristalino, pero intensamente fracturado y/o

deformado o con inclusiones llenas, pueden ser perjudiciales para el concreto (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C, 2014).

La presencia de trazas de caolinita da indicios de la alteración de los feldespatos (albita o plagioclasa sódica) presentes en el agregado (J.F., 1997), lo que puede favorecer la reacción álcali-sílice, ya que algunos autores sospechan que la presencia de feldespatos potásicos o sódicos alterados pueden liberar álcalis en la solución del concreto (Cavalcante- da Silva, Barreto Monteiro, & Duarte Gusmao, 2011).

Según Martín A, Gadea J, Campos P, Calderon V, Garcia M y Rodriguez A (2010), destacan que la presencia de feldespato potásico, cuarzo con extinción ondulante y micas como biotita y moscovita en los áridos, podrían ser causa de una reactividad álcali – silicato capaz de generar grietas en la superficie de las probetas del concreto. Otra forma de cuarzo reactivo presente en este agregado es el cuarzo microcristalino, el cual puede dar lugar a una reacción de tipo rápido (Velasco Torres, 2014), sin embargo, este mineral se encuentra en pequeñas proporciones, al igual que los granos de cuarzo con extinción ondulante, moscovita, cuarzo fracturado, esquisto y biotita que se considera que podrían generar una reacción álcali-sílice lenta. Ésta reacción se caracteriza por que la solución que contiene los álcalis y que puede aumentar por los aportes de feldespatos y micas, penetra a zonas reactivas por medio de las alteraciones estructurales (fracturas) del cuarzo, o de forma superficial, manifestándose de 20 a 50 años después de la construcción de la estructura en concreto (Velasco Torres, 2014).

Analizando los resultados del reconocimiento macroscópico de la arena de peña el único mineral encontrado fue cuarzo, es decir el 100% de las partículas son resistentes; en contraste el ensayo petrográfico indica que el mineral predominante es el cuarzo y en pequeña proporción, se encuentran algunos granos de feldespato. Por su parte el ensayo de difracción de rayos x, arrojo resultados que muestran la existencia de cuarzo y algunas trazas de caolinita. Es posible observar que los resultados obtenidos de los ensayos son similares puesto que todos coinciden que el mineral predominante es el cuarzo; las trazas de caolinita encontrada en la difracción de rayos x son producto de alteración de los feldespatos encontrados en la petrografía, los cuales podrían propiciar una reacción al liberar los álcalis que lo componen. Sin embargo, la cantidad en que se presentan es despreciable y los granos de cuarzo se encuentran en buen estado; por lo cual es complejo que se produzca una reacción.

En cuanto al triturado de ½", el análisis macroscópico revela la existencia de areniscas cuarzosas, feldespáticas, litoarenitas y chert, compuestos por minerales de cuarzo, fragmentos líticos, moscovita, feldespato, pirita, ferromagnesianos y

óxidos de hierro. Así mismo, mediante el ensayo petrográfico se identificaron principalmente granos de cuarzo y moscovita; y en baja proporción, circón, óxidos de hierro, feldespatos alterados, carbonatos y cuarzo microcristalino. También se observó que, de los 14 granos analizados de la sección delgada, cinco de ellos (36 %) muestran extinción ondulante en algunos cristales de cuarzo y diez de ellos (71%) presentan algún tipo de fracturamiento en los granos de cuarzo, siendo el de mayor proporción el intragranular y de menor el intergranular, variando de alto a bajo grado de fracturamiento con una recurrencia similar. Otro de los aspectos analizados fueron los resultados obtenidos de la difracción de rayos x, la cual arroja que el mineral principal que contiene este agregado es el cuarzo, además de trazas de albita, calcita, moscovita y caolinita; siendo esta última consecuencia de la alteración de la albita (Plagioclasa sódica) y finalmente la calcita actuando como material cementante de algunos agregados del triturado, como se observó en la petrografía. Al igual que en la arena de río, el cuarzo deformado, fracturado y microcristalino, el feldespato alterado y la moscovita, pueden producir una reacción lenta con los álcalis del cemento. El chert rico en sílice de grano fino puede ser reactivo a los álcalis según el anexo 3. Sin embargo, debido a que el chert solo fue identificado mediante el ensayo macroscópico no se considera un dato significativo para que afecte en las propiedades del concreto.

El reconocimiento macroscópico del triturado de $\frac{3}{4}$ " señala que este agregado se encuentra constituido por cuarzoarenitas, litoarenitas y chert, cuyos minerales son el cuarzo, moscovita, fragmentos líticos, óxidos de hierro y piritas. Respecto a los ensayos petrográficos se identificó una grawaca y minerales de cuarzo, algunos con extinción ondulante, moscovita, carbonatos de calcio y circón. En cuanto a la difracción de rayos x, se encontró cuarzo en alto contenido y trazas de caolinita y moscovita. Debido a que el cuarzo casi no presenta extinción ondulante ni fracturamiento, es factible afirmar que no se va a producir una reacción álcali-sílice. La grawaca encontrada en la petrografía no se considera reactiva, ya que no presenta ángulo de extinción ondulante de 25° o más, cuarzo microcristalino o criptocristalino (Romero Buitrago, 2010).

11.2. COMPORTAMIENTO DE LOS AGREGADOS EN FILTROS

Un medio filtrante debe cumplir con algunas características como una granulometría adecuada, tamaño efectivo, coeficiente de uniformidad, peso específico y porosidad que garanticen un lavado con la menor cantidad de agua posible y que permitan eliminar la mayoría de partículas suspendidas para que de esta manera se pueda obtener un efluente de la mejor calidad (Suarez G & Pernalet S, 2015). Con el fin

de analizar los agregados que pueden emplearse como medio filtrante, se realizó el ensayo de granulometría obteniéndose un tamaño efectivo de 0.123 mm para la arena de río y de 0.075 mm para la arena de peña, valores que no cumplen con las recomendaciones dadas por Jorge Arboleda Valencia (0.45 - 0.55), por la NTC 2572 (0.35 – 0.65) y por el Ras 2000 (0.45 – 0.65). El tamaño efectivo juega un papel fundamental en el desempeño de un filtro (Perea Torres, Torres Lozada, Cruz Vélez, & Escobar Rivera, 2013), ya que si las partículas son bastante pequeñas se generan fuerzas de fricción que impiden la rápida circulación del agua, mientras que si son de gran tamaño, los flóculos a filtrar pasarán fácilmente a través del lecho, impidiendo su correcta remoción (Rivera B. , 2016). Otro efecto que se produce al tener partículas de tamaño muy fino, es que la calidad del agua es mejor; sin embargo, no permite que muchos de los flocs penetren en el lecho filtrante. Además, las partículas se compactan con mayor facilidad lo que dificulta el lavado. Con las partículas de mayor tamaño, se pueden conseguir mejores operaciones de lavado y prolongados tiempos de funcionamiento, no obstante, existe una mala calidad del agua filtrada y el caudal de lavado debe ser mayor para producir una expansión similar (Weber, 2003). Teniendo en cuenta lo anterior, Jorge Arboleda recomienda que las partículas tengan un diámetro menor a 2 mm, por lo que sería necesario ajustar la granulometría de los agregados eliminando los granos mayores a este tamaño. De acuerdo a la curva granulométrica obtenida para la arena de río y para la arena de peña es posible establecer que esta última es mejor que el otro tipo de agregado ya que sus partículas presentan mayor homogeneidad en sus tamaños y esto evita que las partículas más pequeñas se depositen en la parte superior y obstruyan los poros (Gallis Fuentes, 2007).

Otra de las características que debe cumplir el medio filtrante es el coeficiente de uniformidad, el cual fue de 14.73 para la arena río y de 4.40 para la arena de peña. Estos datos no se encuentran dentro de los límites establecidos por Jorge Arboleda Valencia (1.5 – 1.7), por la NTC 2572 (≤ 1.7) y por el RAS 2000 (1.35 -1.70), por lo cual su uso para filtros no es adecuado, ya que las partículas del agregado son poco uniformes lo que indica que las arenas están bien gradadas, en especial la arena de río. Esto genera que las partículas de menor tamaño tiendan a ocupar los vacíos entre las partículas más grandes, lo que puede producir una disminución en la velocidad de filtración y por tanto una reducción del rendimiento del filtro.

Con referencia a la densidad de las partículas del medio filtrante, se obtuvo un valor de 2.68 para la arena de río y de 2.49 para la arena de peña, lo cual satisface lo fijado por Jorge Arboleda (Mayor a 2). Esta densidad garantiza que las partículas del lecho se expandan de una forma tal que la resistencia de las mismas sea la menor al paso del flujo, que elimine los flóculos y que a su vez evite que estas sean

removidas al producirse el flujo ascendente por lavado, que es inverso a su peso propio (Gallis Fuentes, 2007).

El contenido de materia orgánica encontrado tanto para la arena de río como para la arena de peña fue nulo, como se mencionó anteriormente. Estos resultados indican que este agregado es adecuado para emplearlo como material filtrante ya que un lecho de arena debe estar exento de materia orgánica puesto que su existencia propicia la reproducción de colonias de bacterias que provocan gases tóxicos en el agua y lo que produce una pérdida de eficiencia en la filtración de los flóculos (Oxidine, 2017).

Al realizar el ensayo de porosidad descrito por el autor Jorge Arboleda Valencia en su libro "Teoría y práctica de la purificación del agua", se obtuvo una porosidad real de 74% para la arena de río y de 98% para la arena de peña, lo que no cumple con lo recomendado según el autor, cuyos valores deben estar entre 42% y 45% para arenas redondeadas y entre 44% y 47% para arenas angulares. Las porosidades obtenidas son altas y generan grandes pérdidas de carga inicial además de presentar mayor dificultad en el lavado del filtro. Sin embargo, los valores de porosidad para un material arenoso varían entre el 20% y 50% (Sanders, 1998), por lo cual es posible deducir que los resultados obtenidos no son verídicos ya que estas porosidades sobrepasan el valor máximo según la literatura. Respecto a esto, se evidenció que el ensayo es deficiente puesto que no se especifica el caudal que debe fluir por el medio y esto impide obtener resultados reales.

Finalmente, la petrografía señala que el mineral predominante es el cuarzo, sobre todo en el agregado de arena de peña, el cual posiblemente cumpla con el requerimiento de que el porcentaje de material silíceo sea mayor al 85%. Sin embargo, en el ensayo no se realizó un análisis más detallado en el que se establecieran las cantidades porcentuales de los minerales en el agregado, por lo cual es inapropiado afirmarlo (NTC 2572, 2010, pág. 18).

Los agregados gruesos analizados deben cumplir con ser un material resistente a la abrasión para ser empleado como soporte al medio filtrante (Arboleda, 2000, pág. 444). El ensayo de desgaste de los agregados gruesos, en la máquina de los ángeles muestra un desgaste de 29% y 28% para el triturado de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ". Se analiza que estos resultados son favorables para emplear los agregados como soporte en filtros. Sin embargo, los valores de partículas planas y alargadas son mayores al 2%, por lo cual algunas partículas presentan fragilidad que hacen su uso menos eficiente. Por último, este agregado cumple con el valor de gravedad específica en el estado saturado superficialmente seco recomendado por Jorge Arboleda, que es mayor a 2.5, ya que el resultado fue de 2.59 para el triturado de $\frac{1}{2}$ " y de 2.58 para el triturado de $\frac{3}{4}$ ".

CONCLUSIONES

Para obtener un concreto de buena calidad, la distribución de los tamaños de las partículas del agregado debe cumplir los requisitos establecidos en la NTC 174 (Tabla 12 y 13), sus formas deben ser angulares, que para el caso de los agregados gruesos deben presentar un porcentaje máximo del 10% al 15% de partículas planas y alargadas. Otra característica como la absorción debe ser menor a 5% para agregado fino y menor al 3% para agregado grueso, la densidad debe ser mayor o igual a 2.25, desgaste en la máquina de los ángeles máximo del 40%, sanidad con sulfato de magnesio menor al 15% para agregado fino y menor al 3% para agregado grueso, debe estar exento de materia orgánica; y partículas deleznable máximo de 3% para agregado fino y del 2% al 10% para agregado grueso.

La arena de río presenta características físicas como absorción, densidad, forma, textura, bajos porcentajes de terrones de arcilla y partículas deleznable y ausencia de impurezas orgánicas que permiten fabricar un concreto con características óptimas de resistencia y durabilidad; además de una granulometría que se ajusta a la establecida en la NTC 174. Se recomienda el uso de este agregado en construcciones de estructuras de concreto que no se encuentren expuestas al intemperismo debido a los resultados poco satisfactorios obtenidos en el ensayo de sanidad. Por su parte, las características mineralógicas obtenidas del reconocimiento macroscópico indican que este agregado está constituido por minerales de cuarzo que corresponden al 68%, fragmentos de roca y filosilicatos como biotita y moscovita en un porcentaje de 32%, lo que representa que este agregado ha sufrido un transporte de alta intensidad. Los resultados de petrografía muestran cristales de cuarzo y moscovita principalmente, plagioclasa y anfíbol en menor cantidad y biotita, piroxeno, circón, feldespato potásico y cuarzo microcristalino como minerales menos abundantes; la difracción de rayos x arroja alto contenido de cuarzo, albita (plagioclasa sódica) en cantidades medias, actinolita, apatita y biotita en bajos porcentajes, además de trazas de caolinita. Existen indicios que nos permiten recomendar estudios más profundos de la composición de las muestras ya que podría generar una reacción álcali – sílice de tipo lenta y afectar el concreto en rangos entre 20 y 50 años, lo cual no cumpliría con una vida útil de 50 años para edificios de vivienda (Anexo 4). Sin embargo, esto se podría corroborar determinando los porcentajes de minerales reactivos en el agregado, lo que se sale del alcance de la investigación.

Se comprobó que la arena de peña no es adecuada para emplearla como agregado fino en una mezcla de concreto, debido a que su granulometría está fuera de los límites establecidos por la NTC 174 y evidencia una mala gradación que afecta las

propiedades del concreto fresco como las proporciones de los agregados, del cemento y agua, lo que aumenta sus costos de producción, y disminuye su trabajabilidad y durabilidad. Asimismo, se identificó que la resistencia de este material ante la presencia de los sulfatos es insuficiente, por lo que su exposición ante los agentes atmosféricos causa deterioro en el concreto. En el reconocimiento macroscópico el único mineral encontrado fue el cuarzo lo que representa que el agregado también ha estado expuesto a procesos de transporte bastante intensos. Los resultados de petrografía muestran que el mineral predominante es el cuarzo y en pequeña proporción, se encuentran algunos granos de feldespato; por su parte la difracción de rayos x arroja la existencia de cuarzo y algunas trazas de caolinita. Según su composición es posible afirmar que la composición de la arena de peña no presenta minerales reactivos con los álcalis del cemento.

El triturado de $\frac{1}{2}$ " presenta las propiedades físicas y mecánicas que garantizan un concreto de buena calidad ya que los ensayos de granulometría, terrones de arcilla y partículas deleznales, densidad, absorción y desgaste fueron satisfactorios, por lo cual se recomienda su uso en estructuras de concreto. Las propiedades mineralógicas alcanzadas del reconocimiento macroscópico revelan la existencia de minerales de cuarzo, fragmentos líticos, moscovita, feldespato, pirita, ferromagnesianos y óxidos de hierro. Así mismo, por medio del ensayo petrográfico se identificaron principalmente granos de cuarzo y moscovita, y en pequeñas cantidades circón, óxidos de hierro, feldespatos alterados, carbonatos y cuarzo microcristalino y con extinción ondulante. La difracción de rayos x señala la presencia de minerales de cuarzo y trazas de albita, calcita, moscovita y caolinita. Es importante tener en cuenta que la composición mineralógica del agregado puede generar una reacción álcali sílice lenta que se debe verificar en un estudio más detallado, con los porcentajes de cristales reactivos y en caso de presentarse cantidades mayores a los mencionados en la tesis doctoral de Velasco 2014, no emplear este triturado en el concreto.

Respecto al triturado de $\frac{3}{4}$ ", se identificó que sus características son las mejores para su utilización en el concreto en comparación a los demás agregados sujetos de esta investigación; debido a que los resultados obtenidos de los ensayos de granulometría, densidad, absorción, terrones de arcilla y partículas deleznales, sanidad, desgaste y composición mineralógica permiten que el concreto tenga características en estado fresco y endurecido apropiadas que aseguren mayor resistencia, durabilidad, permeabilidad y una densidad óptima. Según la composición mineralógica obtenida del reconocimiento macroscópico: se encuentran minerales de cuarzo, moscovita, fragmentos líticos, óxidos de hierro y piritas; de los ensayos petrográficos: minerales de cuarzo, algunos con extinción ondulante, moscovita, carbonatos de calcio, circón y una grawaca; y de la difracción

de rayos x: cuarzo en alto contenido y trazas de caolinita y moscovita; minerales que no producen una reacción álcali sílice.

Respecto al medio filtrante, debe cumplir con algunas características según Jorge Arboleda Valencia como diámetros menores a 2 mm, peso específico no inferior a 2, exentos de materia orgánica, coeficiente de uniformidad entre 1.5 y 1.7, tamaño efectivo entre 0.4 y 0.7, porosidad entre 42% y 47% y gravedad específica mayor a 2.5. Al analizar el agregado fino, arena de río y arena de peña como material filtrante para la purificación de agua, se observó que la granulometría obtenida no es satisfactoria puesto que no se cumple con los parámetros recomendados como tamaño efectivo (Te), coeficiente de uniformidad (Cu) y tamaño de los granos, que son adecuados para obtener un lecho ideal que garanticen la mayor eficiencia del filtro.

Las gravillas empleadas como soporte para filtros deben ser redondeadas, tener gravedad específica mayor a 2.5, libre de impurezas orgánicas y partículas planas o alargadas menores a 2%. En cuanto a los resultados obtenidos del triturado de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ", señalan que no son adecuados para este uso. Aunque su resistencia a la abrasión y gravedad específica sean apropiadas, el porcentaje de partículas planas y alargadas es bastante alto, lo que las hace más frágiles y menos resistentes a las operaciones de lavado y filtrado. Esta fragilidad genera reducción en el tamaño de las partículas debido a su desintegración, lo que propiciaría el movimiento de las mismas por la acción del agua y la obstrucción del drenaje.

El estudio de las propiedades físicas de los materiales utilizados en la construcción es de gran importancia, ya que de esta manera se pueden conseguir concretos de buena calidad que garanticen una prolongada vida útil de las estructuras. Asimismo, un análisis detallado obtenido por medio de la microscopía óptica y difracción de rayos x arrojan resultados en cuanto a la composición de los minerales que pueden ser reactivos con los álcalis del cemento y causar patologías en el concreto. Otro uso popularizado de los agregados es como lecho filtrante y para obtener agua de la mejor calidad también es fundamental identificar sus características. Esto es esencial debido a que en la práctica se emplean agregados sin relacionar sus propiedades con el uso que se le va a dar.

BIBLIOGRAFÍA

- Pontificia Universidad de Chile. (2017). *Laboratorio de difracción de rayos x. ¿Para qué sirve la Difracción de Rayos X (DRX)*. Obtenido de <http://servicios.fis.puc.cl/rayosx/definicion.html>
- Alfonzo, R. J. (2006). La porosidad de las rocas carbonatadas. En D. d. Geoquímica). Universidad de Oviedo.
- Angel Martínez, M., Fontao Orosa, I., Leiro López, A., López Ramos, S., Mateo Sanz, B., & Prendes Rubiera, N. (1996). Patologías del hormigón. Interacción entre el ataque por sulfatos y la reacción alcali árido. *GEOGACETA*.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua : Teoría de la filtración del agua* (3 ed., Vol. Tomo 2). Bogotá D.C: McGraw - Hill.
- Cavalcante- da Silva, C., Barreto Monteiro, E., & Duarte Gusmao, A. (2011). Análisis de métodos de prevención de la reacción alcali agregado: Análisis petrográfico y método acelerado para barras de mortero. *Revista de Ingeniería*.
- CEPIS, & OPS. (2005). Especificaciones Técnicas para construcción de sistemas de filtración de múltiples etapas. Lima.
- Chan Yam, J. L., Solís Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 39.
- Corbí, H., & Martínez, J. (2015). Interpretando ambientes sedimentarios: taller de sedimentología con arenas como actividad didáctica de Ciencias de la Tierra. *Experiencias e ideas para el aula*.
- De Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida*. Lima, Perú: Centro Paramericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del medio ambiente.
- Degrémont. (1973). *Manual técnico del agua*. (T. e. España., Ed.) Obtenido de <ftp://ceres.udc.es/>:
ftp://ceres.udc.es/Grado_TECIC/Cuarto_Curso/Ingenieria%20Ambiental/Filtracion/TEMA-filtraci%C3%B3n-rev140211-ajb.pdf
- Dijk, J. C., & Oomen, J. H. (1978). Filtración lenta en arena para abastecimiento público de agua en países en desarrollo: Manual de diseño y construcción. *CIR Serie Documentos Técnicos, Vol. 11*.

- Dorado, A. C. (2015). *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. Ediciones Paraninfo SA.
- Duque, G. (2016). rocas sedimentarias. en: manual de geología para ingenieros. manizales, universidad nacional de colombia. Manizales, Colombia.
- Ferreira Cuellar, D. A., & Torres López, K. M. (2014). Caracterización física de los agregados petreos para concretos caso: Vista Hermosa (Mosquera) y mina Cemz (Apulo). Bogota: Universidad Católica de Colombia: Programa de Ingeniería Civil.
- Ferreira, D. A., & Torres, K. M. (2014). *Caracterización física de agregados pétreos para concretos caso: Vista hermosa (Mosquera) y Mina Cemex (Apulo)*. Bogota: Trabajo de grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil.
- Franco, M., & Gonzalo, J. (2000). Taller de petrología: enseñanza de la petrología con el microscopio petrográfico. En *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* (Vol. 8 no 8.1, pág. 40).
- Gallis Fuentes, C. S. (2007). *Estudio comparativo entre un lecho filtrante de alta tasa, monocapa, lavado con aire - agua y un lecho convencional, bicapa, autolavado con agua*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil.
- Gmas Laboratorio de geología. (2017). *Microscopía óptica. Petrografía*. Obtenido de <http://gmaslab.com/petrografia/>
- Guarín Insignares, H. (2011). *Análisis estratigráfico, petrográfico y geoquímico de los episodios fosfáticos de la parte inferior y media del grupo Guadalupe en el sector central de la cordillera oriental*. Bogotá, Colombia: Tesis, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias.
- Gutiérrez de Lopez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. (Vol. Capitulo 2). Manizales: Universidad Nacional de Colombia – sede Manizales.
- Harmsen, T. E. (2005). *Diseño de estructuras de concreto armado* (Cuarta ed.). Perú: Fondo editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.
- INGEOMINAS. (1987). Recursos Minerales en Colombia. En *Minerales preciosos rocas y minerales no metálicos recursos energéticos* (págs. 660-672).
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (2014). *Reactividad Alkali-Agregado*. México: IMCYC.

- J.F., B. (1997). El caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones. *Boletín de la sociedad Española de cerámica y vidrio*, 7-20.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ciencias.
- Jimenez, J., & Velilla, N. (2004). Óptica Mineral”: una herramienta informática para el estudio de los minerales en el microscopio petrográfico. En *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* (págs. 57-61).
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Skokie, Illinois, EE.UU: Portland Cement Association.
- L, R., P, M., A, L., F, B., & A, G. (2008). Influence of the physical and mechanical characteristics of the sands on the hydraulic and biological behaviors of sand filters. *ScienceDirect*, 10.
- Macias, D. (2017). *Tópicos de nuevos materiales catalíticos: Difracción de rayos x*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/mtrodavidmaciasferrer/difraccin-de-rayos-x>
- Monroe, J., Reed, W., & Pozo, M. (2008). *Geología dinámica y evolución de la tierra*. España: Paraninfo.
- Muñoz Salinas, F., & Mendoza Escobedo, C. J. (2012). La durabilidad en las estructuras de concreto reforzado desde la perspectiva de la norma Española para estructuras de concreto. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*.
- Nilson, A. (2001). *Diseño de estructuras de concreto*. Bogotá: Mc Graw Hill.
- Noirjean, P. (1996). *Caracterización de arenas para el uso de filtración lenta*. Colombia: Lausanne.
- NTC 127. (2000). *Norma Técnica Colombiana: Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas del agregado fino para concreto*. Bogotá D.C.: ICONTEC.
- NTC 174. (2000). *Norma Técnica Colombiana: Especificaciones de los agregados para concreto*. Bogotá D.C.: ICONTEC.
- NTC 2572. (2010). *Norma Técnica Colombiana: Material filtrante granular*. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

- Oxidine. (2017). *Limpieza y desinfección. Filtros de arena*. Obtenido de Oxidine: <http://www.oxidine.net/soluciones-gestion-eficiente/limpieza-y-desinfeccion-filtros-arena/>
- Perea Torres, L., Torres Lozada, P., Cruz Vélez, C., & Escobar Rivera, J. (2013). Influencia de la configuración del medio filtrante sobre el proceso de filtración a tasa constante del agua clarificada del río Cauca. *Revista de Ingeniería*.
- Perez, J. A. (1981). Manual de tratamiento de aguas. *Filtración*. Medellín, Universidad Nacional, Facultad de minas: Trabajo (Requisito parcial para ingresar a la categoría de profesor asociado).
- Pinto Alonzo, C. E. (2004). *Caracterización de bancos para agregados de concreto y morteros, ubicados en los municipios de Tactic y San Cristobal Verapaz, en el departamento de Alta Verapaz. Trabajo de grado*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Quiroz, M., Salamanca, L., & Antezana, O. (2006). *Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje en la asignatura de "tecnología del hormigón"*. Cochabamba, Bolivia: Universidad mayor de San Simón.
- R.M., E., F.J., A., & J., O. (2017). *La petrofísica en la interpretación del deterioro y la conservación de la piedra de edificación*. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad de Oviedo(2008)
- RAS. (2000). *Reglamento Técnico del Sector de agua potable y saneamiento básico: Sistemas de potabilización*. Bogotá D.C.
- Rivera, B. (2016). *Granulometría para medios filtrantes*. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/doc/313065887/Granulometria-Para-Medios-Filtrantes>
- Rivera, G. (2013). Concreto simple. En *Cap. 4: Manejabilidad del concreto*. Popayan: Universidad del cauca.
- Romero Buitrago, N. (2010). *Manual preliminar de petrografía aplicada al estudio de materiales pétreos para carreteras*. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS.
- Romero R, J. (1993). *Acuipurificación*. Bogota D.C: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sanders, L. (1998). *A manual of Field hydrogeology*. Prentice - Hall.

- Scholle, P. (1979). Constituents, textures, cements and porosities of sandstones and associated rocks. En *The American Association of Petroleum Geologist* (págs. 2-63). Tulsa, Oklahoma.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Petrografía*. Obtenido de Rocas.: <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/rocas/petrografia>
- Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación. (2017). *Difracción de rayos x. Técnicas*. Obtenido de slide share: <https://es.slideshare.net/maoxro/difraccion-rayos-x>
- Suarez G, D. A., & Pernalet S, A. E. (2015). *Comparación en adsorción de hierro total en aguas subterráneas, utilizando quitosano y acarbón activado como medios filtrantes*. Maracaibo, Venezuela: Universidad Rafael Urdaneta. Facultad de Ingeniería Civil. .
- Suarez, J. (1998). Análisis geotécnico. En *Deslizamientos* (Primera ed., págs. 339-386). Bucaramanga.
- Torres, C. A., & Villanueva, S. (2014). *El filtro lento de arena: Manual para el armado, instalaciones y monitoreo*. Bogota D.C.: Universidad piloto de Colombia. Programa de ingeniería civil.
- Universidad de Alicante. (2017). *Servicios técnicos de investigación. Difracción de rayos x*. Obtenido de <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/difraccion-de-rayos-x.html>
- Universidad de Oviedo. (2004). Materiales pétreos naturales. En U. d. Oviedo, *Materiales de construcción* (pág. 31). España: Universidad de Oviedo.
- Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (25 de Abril de 2017). *Difracción de rayos x, introducción*. Obtenido de https://www.upct.es/~minaees/difraccion_rayosx.pdf
- Varas, M. J., Álvarez de Buergo, M., & Fort, R. (2007). Piedras artificiales: morteros y hormigones. El cemento como máximo representante de estos materiales de construcción. *Instituto de Geología Económica*.
- Velasco Torres, A. (2014). *Estudio experimental sobre la reacción alcali-sílice en el hormigón producida por áridos de reacción lenta. Tesis doctoral*. Madrid, España: Universidad politécnica de Madrid.
- Villalaz, C. c. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Editorial Limusa.

Weber, W. (2003). *Control de la calidad del agua. Procesos fisicoquímicos*.
Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.

ANEXOS

Anexo 1. *Tabla de límites para sustancias dañinas en el agregado fino para concreto*

Material	Máximo porcentaje del peso total de la muestra
Terrones de arcilla y partículas deleznales	3,0
Material que pasa el tamiz 75 µm (No. 200):	
Concreto sujeto a abrasión	3,0 (a)
Todos los demás concretos	5,0 (a)
Carbón o lignito:	
Donde la apariencia superficial del concreto sea de importancia.	0,5
Todos los demás concretos	1,0

Fuente: Tomado del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (NTC 174, 2000)

Anexo 2. Tabla de límites para sustancias dañinas y requisitos de las propiedades físicas del agregado grueso para concreto.

Designación de clase	Tipo o localización de la construcción de concreto	Porcentaje máximo permitido						
		Terrones de arcilla partículas deleznales	Chert (c) (peso específico s.s.s. menor de 2,40)	Sumatoria de terrones de arcilla, partículas deleznales y cherts (peso específico s.s.s. menor de 2,40)	Material que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200)	Carbón y lignitos	Abrasión (a)	Sanidad por sulfato de magnesio (5 ciclos) (b)
REGIONES PLUVIOMÉTRICAS ALTAS								
1S	Zapatas, cimientos, columnas y vigas que no están expuestas a las condiciones atmosféricas, losas internas que van a ser cubiertas.	10,0	---	---	1,0 (d)	1,0	50	---
2S	Pisos interiores sin cubierta	5,0	---	---	1,0 (d)	0,5	50	---
3S	Muros de fundación a nivel, muros de contención, estribos, pilas, vigas compuestas y vigas expuestas a las condiciones atmosféricas.	5,0	5,0	7,0	1,0 (d)	0,5	50	18
4S	Pavimentos, puentes de tablero superior, vías de acceso, bordillos, andenes, patios, garajes o parqueaderos, corredores o estructuras ribereñas sujetas a humedecimiento frecuente.	3,0	5,0	5,0	1,0 (d)	0,5	50	18
5S	Concreto arquitectónico exterior	2,0	3,0	3,0	1,0 (d)	0,5	50	18
Regiones pluviométricas medias								
1M	Zapatas, cimientos, columnas y vigas que no están expuestas a las condiciones atmosféricas, losas internas que van a ser cubiertas.	10,0	---	---	1,0 (d)	1,0	50	---
2M	Pisos interiores sin cubierta.	5,0	---	---	1,0 (d)	0,5	50	---
3M	Muros de fundación a nivel, muros de contención, estribos, pilas, vigas compuestas y vigas expuestas a las condiciones atmosféricas.	5,0	8,0	10,0	1,0 (d)	0,5	50	18
4M	Pavimentos, puentes de tablero superior, vías de acceso, bordillos, andenes, patios, garajes o parqueaderos, corredores, o estructuras ribereñas sujetas a humedecimiento frecuente.	5,0	5,0	7,0	1,0 (d)	0,5	50	18
5M	Concreto arquitectónico exterior.	3,0	3,0	5,0	1,0(d)	0,5	50	18
Regiones pluviométricas bajas								
1N	Losas sujetas a la abrasión del tráfico, puentes de tablero superior, pisos, andenes, pavimentos.	5,0	--	--	1,0(d)	0,5	50	--
2N	Todas las demás clases de concreto	10,0	--	--	1,0(d)	1,0	50	--

Fuente: Tomado del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (NTC 174, 2000)

Anexo 3. Tabla de Rocas reactivas según el centro de investigación en pavimentos de California

Categoría 1	Minerales reactivos a los álcalis pobremente cristalinos o sílice metaestable, y vidrios volcánicos o artificiales (Reactividad álcali-sílice clásica)
Reactantes	Ópalo, tridimita, cristobalita, vidrios volcánicos, vidrios artificiales, beekita.
Rocas	Tipos de roca conteniendo ópalo, tales como shales, areniscas, rocas carbonatadas silificadas, algunos cherts, flints y diatomitas. Rocas volcánicas vitrofíricas: Riolitas, dacitas, latitas, andesitas y sus tobas, perlitas, obsidianas; todas las variedades con rocas masivas vidriadas; algunos basaltos.
Categoría 2	Rocas alcalino-reativas conteniendo cuarzo
Reactantes	Calcedonia, cuarzo criptocristalino a microcristalino, cuarzo con cristal deformado, rico en inclusiones, intensamente fracturado o granulado; cuarzo pobremente cristalizado en el contorno de los granos; cuarzo cementado sobredesarrollado (en areniscas)
Rocas	Cherts, flints, vetas cuarzosas, cuarcitas, areniscas cuarcíticas que contengan cuarzo microcristalino a criptocristalino y/o calcedonia. Rocas volcánicas tales como aquellas de la categoría , pero con masas criptocristalinas a microcristalinas desvitrificadas. Rocas con silicatos micro granular a macro granular de origen variado conteniendo cuarzo de microcristalino a criptocristalino: <ul style="list-style-type: none"> a. Rocas metamórficas: gneiss, esquistos mico-cuarzosos, cuarcitas, hornfelses, filitas, argilitas, slates b. Rocas ígneas: granitos, granodioritas, charnokitas c. Rocas sedimentarias: Areniscas, grauvacas, siltstones, shales, calizas síliceas, arkoses. Rocas sedimentarias (areniscas) con cuarzo cementado epitáxico.

Fuente: Tomado del documento del (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C, 2014)

Anexo 4. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructuras según la normativa española del concreto Estructural

Tabla 1. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructuras según la normativa Española del Concreto Estructural.	
Tipo de estructura	Vida útil
Estructuras de carácter temporal.	Entre 3 y 10 años
Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal (por ejemplo, barandales, apoyos de tuberías).	Entre 10 y 25 años.
Edificios (o instalaciones) agrícolas o industriales y obras marítimas.	Entre 15 y 50 años.
Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil; excepto obras marítimas, de repercusión económica baja o media.	50 años.
Edificios de carácter monumental o de importancia especial. Puentes de longitud total igual o superior a 10 metros y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta.	100 años

Fuente: Tomado del documento de (Muñoz Salinas & Mendoza Escobedo, 2012)