

Evaluación de la resistencia a la compresión de especímenes de concreto simple elaborados a partir de agua potable y aguas residuales tratadas de tipo doméstico e industrial, con concentraciones totales de cloruros, sulfatos y álcalis diferentes

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Civil

Johana Alejandra Gómez Sabogal

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Civil

Bogotá D.C.

2020

Evaluación de la resistencia a la compresión de especímenes de concreto simple elaborados a partir de aguas residuales tratadas de tipo doméstico e industrial, con concentraciones totales de cloruros, sulfatos y álcalis diferentes

Johana Alejandra Gómez Sabogal

Código: 10481528355

Director:

Edison Osorio Bustamante

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Civil

Bogotá D.C.

2020

Nota de Aceptación

Firma Director

Firma jurado

Firma jurado

Bogotá D.C.

Agradecimientos

Al concretar un trabajo como el proyecto de grado en el cual se tuvieron que afrontar un número importante de dificultades para lograr un entregable digno de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Antonio Nariño, cabe resaltar que para haber culminado y obtenido la aprobación de dicho trabajo tengo que agradecer infinitamente en primer lugar a Dios, por haberme permitido acceder a una carrera universitaria y así mismo haber contado con los medios y recursos necesarios para poder cumplir con las diferentes etapas de este proceso educativo. A mis padres Ligia Stella Sabogal Pulido y John Alexander Gómez Huertas quienes han sido los pioneros en formarme en valores como la honestidad, humildad y carisma, por su apoyo emocional y su constante voz de aliento en los momentos más complejos de este proceso, sin los cuales hubiese sido imposible alcanzar el objetivo planteado desde el inicio. A Julieth Lorena López Castro a quien considero mi mejor amiga y por ende una de las personas más importantes e influyentes en el desarrollo de mi carrera dentro y fuera de la Universidad, también por su convicción y palabras de aliento en los momentos de frustración; A Luis Felipe Pinzón Rincón quien me brindo todo su apoyo para estudiar y graduarme como Tecnóloga en Obras Civiles de El Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.

A los docentes e ingenieros civiles; José Pedro Blanco Romero quien me encaminó y motivó al desarrollo del objeto de estudio del proyecto; Edison Osorio Bustamante quien se encargó de asesorarme, corregirme y motivarme a desarrollar y perfeccionar esta investigación; Carlos Arturo Santamaría Rodríguez quien más allá de apoyarme en el desarrollo de la parte técnica del presente trabajo, también me alentó a no desfallecer en los momentos más críticos; Elquier Enrique Daza Redondo quien me orientó en los fundamentos teóricos y prácticos de este estudio y me permitió hacer uso de las instalaciones de su laboratorio DAICON S.A.S.

Al personal encargado de la operación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable El Gatillo, de la Empresa Aguas de Facatativá EAF S.A.S. ESP, así como el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) La Yerbabuena y a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la empresa INDALPE LTDA., quienes me autorizaron y permitieron tomar las muestras de agua requeridas para la debida ejecución del proyecto.

Y por último y no menos importante a la Universidad Antonio Nariño, quien me abrió sus puertas, proporciono espacios y otorgo todas las herramientas necesarias para formarme como profesional.

“Mereces lo que sueñas” Gustavo A. Cerati C.

RESUMEN

Este proyecto de investigación evaluó la resistencia a la compresión de especímenes de concreto simple elaborados a partir de tres tipos de agua, agua potable y aguas residuales tratadas de tipo doméstico e industrial, y con mezclas compuestas cada una por un tipo de agua diferente. Este estudio tiene gran importancia en el campo de la ingeniería civil, principalmente en el desarrollo de la industria de la construcción en la que se emplean grandes cantidades de agua potable para la elaboración de concreto, por lo que cabe destacar y aclarar que debido a la limitación del recurso hídrico se deben buscar alternativas amigables con el planeta que garanticen la proliferación de la misma, razón por la cual se plantea la reutilización del agua residual tratada tanto doméstica como industrial.

Por otra parte para el óptimo desarrollo de la presente investigación inicialmente se determinaron las concentraciones totales de cloruros, sulfatos y álcalis de cada uno de los tipos de agua mencionados anteriormente, las cuales se pretenden comparar de acuerdo con los valores máximos que recomienda la norma NTC 3459 (ICONTEC, 2001) para verificar si dichas aguas son aptas y cumplen con los estándares de calidad requeridos para la elaboración de concreto. Posteriormente se elaboraron los especímenes a partir de mezclas compuestas cada una por un tipo de agua diferente y finalmente se evaluó la resistencia a la compresión de los mismos a los 28 días.

De acuerdo con lo planteado anteriormente este proyecto permitió evaluar de manera directa el comportamiento de los especímenes de concreto elaborados a partir de los diferentes tipos de agua, mediante la determinación de su resistencia a la compresión a la edad de 28 días de curados para corroborar si estos cumplen con la resistencia establecida en el diseño y así concluir que la reinversión en el uso de aguas reutilizadas es un camino rentable y una alternativa segura para utilizar en la producción de concreto y del mismo modo contribuir con la conservación del agua potable la cual es un recurso de tipo limitado.

ABSTRACT

This research project evaluated the compressive strength of simple concrete specimens made from three types of water, potable water and treated domestic and industrial wastewater, and with mixtures each composed of a different type of water. This study has great importance in the field of civil engineering, mainly in the development of the construction industry in which large quantities of drinking water are used for the elaboration of concrete, so it is worth highlighting and clarifying that due to the limitation of water resources, planet-friendly alternatives must be sought that guarantee its proliferation, which is why the reuse of treated wastewater is proposed, both domestic and industrial.

On the other hand, for the optimal development of this research, the total concentrations of chlorides, sulfates and alkalis of each one of the types of water mentioned initially were determined, which are intended to be compared according to the maximum values recommended by the NTC 3459 standard (ICONTEC, 2001) to verify if these waters are suitable and comply with the quality standards required for the elaboration of concrete. Later, the specimens were elaborated from mixtures composed each one by a different type of water and finally the resistance to the compression of the same was evaluated at 28 days.

In accordance with what was previously stated, this project allowed the direct evaluation of the behavior of the concrete specimens made from the different types of water by determining their resistance to compression at the age of 28 days of curing to corroborate if they comply with the resistance established in the design and thus conclude that the reinvention in the use of reused water is a profitable path and a safe alternative to use in the production of concrete and in the same way contribute to the conservation of drinking water which is a limited type resource.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo General	15
2.2. Objetivos específicos.....	15
3. MARCO CONCEPTUAL.....	16
3.1. Concreto.	17
3.2. Cemento portland.	21
3.3. Agua.	23
3.4. Agregados.....	31
4. ESTADO DEL ARTE	33
5. METODOLOGÍA.....	40
5.1. Fase I: Caracterizar las muestras de agua para determinar los contenidos totales de constituyentes inorgánicos presentes en cada una.....	42
5.1.1. Determinación del contenido de cloruros en el agua por el método argentométrico descrito en la norma S.M. 4500 Cl – B (Standard Methods, 2017).	42
5.1.2. Determinación del contenido de sulfatos en el agua por el método turbidimétrico descrito en la norma S.M. 4500 (SO ₄ ⁻²) E (Standard Methods, 2017).	43
5.1.3. Determinación del contenido de carbonatos y bicarbonatos en el agua por el método de titulación descrito en la norma S.M. 2320 B (Standard Methods, 2017).	45
5.2. Fase II: Caracterizar el agregado grueso y fino para determinar sus propiedades físicas.....	49
5.2.1. Determinación de la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados gruesos y finos mediante un proceso de tamizado por el método descrito en la norma NTC 77 (ICONTEC, 2018).	49
5.2.2. Determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en los agregados finos y gruesos por el método descrito en la norma NTC 92 (ICONTEC, 2019).	51
5.2.3. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso por el método descrito en la norma NTC 176 (ICONTEC, 2019).	52
5.2.4. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino por el método descrito en la norma NTC 237 (ICONTEC, 2020).	53
5.2.5. Determinación de la densidad del cemento hidráulico por el método descrito en la norma NTC 221 (ICONTEC, 2019).	55
5.3. Fase III: Elaborar el diseño de la mezcla de concreto.	56

5.3.1. Elaboración del diseño de la mezcla de concreto por el método de la Road Note Laboratory (RNL).	56
5.4. Fase IV: Elaborar y curar los especímenes cilíndricos de concreto simple.	65
5.4.1. Elaboración y curado de los especímenes cilíndricos de concreto simple mediante el método descrito en la norma NTC 1377 (ICONTEC, 2010).	65
5.5. Fase V: Evaluar la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto simple.	66
5.5.1. Realización del ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto para su determinación mediante el método descrito en la norma NTC 673 (ICONTEC, 2010).	66
6. RESULTADOS	67
6.1. Fase I: Caracterizar las muestras de agua para determinar los contenidos totales de constituyentes inorgánicos presentes en cada una.....	67
6.2. Fase II: Caracterizar el agregado grueso y fino para determinar sus propiedades físicas.....	70
6.2.1. Determinación de la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados gruesos y finos mediante un proceso de tamizado por el método descrito en la norma NTC 77 (ICONTEC, 2018).....	70
6.2.2. Determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en los agregados finos y gruesos por el método descrito en la norma NTC 92 (ICONTEC, 2019).74	
6.2.3. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso por el método descrito en la norma NTC 176 (ICONTEC, 2019).	75
6.2.4. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino por el método descrito en la norma NTC 237 (ICONTEC, 2020).	76
6.2.5. Determinación de la densidad del cemento hidráulico por el método descrito en la norma NTC 221 (ICONTEC, 2019).	77
6.3. Fase III: Elaborar el diseño de la mezcla de concreto ($f'c = 28 MPa$).	78
6.4. Fase IV: Elaborar y curar los especímenes cilíndricos de concreto simple.	87
6.5. Fase V: Evaluar la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto simple.	88
7. CONCLUSIONES.....	95
8. RECOMENDACIONES	97
BIBLIOGRAFIA	123

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación del cemento portland.....	21
Tabla 2 Artículos de investigación de Scopus.....	34
Tabla 3 Artículos de investigación de Science Direct.....	37
Tabla 4 Reactivos empleados en el método argentométrico.....	42
Tabla 5 Reactivos empleados en el método turbidimétrico.....	44
Tabla 6 Reactivos empleados en el método de titulación.....	46
Tabla 7 Relaciones de alcalinidad para la determinación del contenido de carbonatos y bicarbonatos.....	48
Tabla 8 Valores recomendados de asentamiento.....	57
Tabla 9 Valores recomendados del contenido de aire.....	57
Tabla 10 Valores recomendados para el agua de mezclado.....	58
Tabla 11 Valores recomendados para la relación agua/cemento (a/c).....	59
Tabla 12 Recomendaciones granulométricas para el agregado grueso.....	60
Tabla 13 Recomendaciones granulométricas para el agregado fino.....	60
Tabla 14 Rangos de valores granulométricos recomendados.....	61
Tabla 15 Contenidos de impurezas inorgánicas obtenidos para la muestra de agua potable.....	68
Tabla 16 Contenidos de impurezas inorgánicas obtenidos para la muestra de agua residual doméstica tratada.....	69
Tabla 17 Contenidos de impurezas inorgánicas obtenidos para la muestra de agua residual industrial tratada.....	70
Tabla 18 Pesos muestra de agregado grueso para la determinación de la granulometría.....	71
Tabla 19 Granulometría obtenida para el agregado grueso.....	71
Tabla 20 Pesos muestra de agregado fino para la determinación de la granulometría.....	72
Tabla 21 Granulometría obtenida para el agregado fino.....	73
Tabla 22 Volumen y pesos del molde y la muestra de los agregados gruesos y finos para la determinación de la MUS y MUC.....	74
Tabla 23 Masas unitarias suelta y compacta para el agregado grueso.....	75
Tabla 24 Masas unitarias suelta y compacta para agregado fino.....	75
Tabla 25 Pesos muestra de agregado grueso para la determinación de las densidades relativas y la absorción.....	76
Tabla 26 Volúmenes y pesos muestra de agregado fino para la determinación de las densidades relativas y la absorción.....	77
Tabla 27 Volúmenes y pesos muestra de cemento hidráulico para la determinación de la densidad.....	78
Tabla 28 Verificación de las especificaciones granulométricas del agregado grueso.....	80
Tabla 29 Verificación de las especificaciones granulométricas del agregado fino.....	80
Tabla 30 Porcentajes que pasan correspondientes a cada tamiz del material combinado.....	82
Tabla 31 Proporciones de los materiales requeridas para 1 m ³ de concreto.....	85
Tabla 32 Cantidades totales de los materiales requeridos para la mezcla.....	86
Tabla 33 Pesos retenidos correspondientes a cada tamiz del material combinado.....	86

Tabla 34 Asentamientos obtenidos para cada tipo de mezcla elaborada.	87
Tabla 35 Resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto simple correspondientes a la mezcla 1.	88
Tabla 36 Resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto simple correspondientes a la mezcla 2.	89
Tabla 37 Resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto simple correspondientes a la mezcla 3.	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estructura del concreto.....	16
Figura 2 Proporciones empleadas en las mezclas de concreto en volumen absoluto.....	17
Figura 3 Propiedades del concreto en estado fresco.....	18
Figura 4 Propiedades del concreto en proceso de fraguado.....	19
Figura 5 Propiedades del concreto en estado endurecido.....	20
Figura 6 Propiedades del cemento.....	22
Figura 7 Ubicación satelital de la Empresa Aguas de Facatativá E.A.F S.A.S E.S.P en el municipio de Facatativá.....	24
Figura 8 Esquema de funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) El Gatillo.....	25
Figura 9 Ubicación satelital del STAR en el asentamiento Yerbabuena en el municipio de Facatativá.....	26
Figura 10 Esquema de funcionamiento del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) La Yerbabuena.....	27
Figura 11 Ubicación satelital de la Empresa INDALPE LTDA en el municipio de Facatativá... 28	28
Figura 12 Esquema de funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Industrial (PTARI) INDALPE.....	28
Figura 13 Características del agua.....	30
Figura 14 Propiedades de los agregados gruesos y finos.....	32
Figura 15 Documentos por país.....	33
Figura 16 Documentos por tipo.....	33
Figura 17 Metodología empleada para la evaluación de la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto.....	41
Figura 18 Muestra de agua potable.....	67
Figura 19 Muestra 2 agua residual doméstica tratada.....	68
Figura 20 Muestra 3 agua residual industrial tratada.....	69
Figura 21 Curva granulométrica para el agregado grueso.....	72
Figura 22 Curva granulométrica para el agregado fino.....	74
Figura 23 Optimización de la granulometría de los agregados grueso y fino.....	81
Figura 24 Curva de resistencia a la compresión en función del tiempo para la mezcla 1.....	88
Figura 25 Curva del porcentaje de evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo para la mezcla 1.....	89
Figura 26 Curva de resistencia a la compresión en función del tiempo para la mezcla 2.....	90
Figura 27 Curva del porcentaje de evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo para la mezcla 2.....	90
Figura 28 Curva de resistencia a la compresión en función del tiempo para la mezcla 3.....	91
Figura 29 Curva del porcentaje de evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo para la mezcla 3.....	92
Figura 30 Curva del porcentaje de evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo para las 3 mezclas.....	93

1. INTRODUCCIÓN

El siguiente proyecto de investigación evaluó la resistencia a la compresión de especímenes de concreto simple elaborados a partir de tres tipos de agua, agua potable y aguas residuales tratadas de tipo doméstico e industrial, y con mezclas compuestas cada una por un tipo de agua diferente, con la finalidad de verificar con cual, de los dos tipos de agua residual tratada de tipo doméstico e industrial, se obtienen resistencias similares a los especímenes elaborados con agua potable.

La importancia de esta investigación es definir la viabilidad de la implementación de las aguas residuales tratadas tanto domésticas como industriales para la sustitución del agua potable en los procesos de producción de concreto y de esta manera procurar su preservación, ya que con base en las consideraciones del Decreto No. 178 (Alcaldía Municipal de Facatativá, 2020) el municipio de Facatativá del departamento de Cundinamarca, en cuanto a oferta presenta índices de escasez, debido a que los niveles de precipitación para el año 2020 han bajado en comparación con los datos recolectados del periodo de 2019, por lo que se puede concluir que año tras año se va reduciendo la cantidad de agua potable con la que se cuenta para el abastecimiento pleno del municipio y sus actividades en general.

Para la realización de este proyecto inicialmente se recolectaron las muestras de agua potable de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) El Gatillo, de agua residual doméstica tratada del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) La Yerbabuena y de agua residual industrial tratada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI) INDALPE, ubicadas en la zona urbana y rural del municipio en mención respectivamente. Posteriormente para cada muestra de agua se determinaron las concentraciones totales de impurezas inorgánicas como cloruros, sulfatos y álcalis con la finalidad de verificar, de

acuerdo con los valores máximos recomendados de concentraciones tolerables establecidos por la norma NTC 3459 (ICONTEC, 2001), si dichas aguas son aptas y cumplen con los estándares de calidad requeridos para la elaboración de concreto. Seguido de esto se elaboraron los especímenes a partir de mezclas compuestas cada una por un tipo de agua diferente y por último se evaluó la resistencia a la compresión de los mismos a la edad de 28 días de curados con el propósito de comprobar si se cumplió con los estándares requeridos de cada mezcla.

Finalmente como resultado de esta investigación se obtuvo la resistencia a la compresión y su porcentaje de evolución para cada uno de los especímenes y con ello se determinó que con ninguno de los especímenes elaborados con aguas residuales tratadas tanto doméstica como industrial se cumplió la resistencia establecida en el diseño.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Comparar la resistencia a la compresión entre tres tipos de especímenes de concreto simple elaborados a partir de diferentes mezclas cuya composición varía de acuerdo con el tipo de agua empleada, es decir, agua potable y aguas residuales tratadas de tipo doméstico e industrial.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar las concentraciones totales de cloruros, sulfatos y álcalis del agua potable y de las aguas residuales tratadas de tipo doméstico e industrial, para posteriormente contrastarlas con los valores máximos recomendados de concentraciones tolerables establecidos por la norma NTC 3459 (ICONTEC, 2001).
- Realizar el diseño de mezcla de concreto mediante el método ACI y de la Road Note Laboratory (RNL), para posteriormente fabricar ocho especímenes concreto simple por cada mezcla elaborada a partir de cada uno de los tres tipos de agua.
- Comparar las resistencias a la compresión obtenidas de las muestras elaboradas de los tres tipos de especímenes de concreto simple con el propósito de definir con cual, de los dos tipos de aguas residuales tratadas de tipo doméstico e industrial, se obtienen resistencias similares a los especímenes elaborados con agua potable.

3. MARCO CONCEPTUAL

En la industria de la construcción, es el concreto uno de los materiales más utilizados a nivel mundial debido a sus propiedades físicas y mecánicas que lo hacen ideal para ser empleado como elemento estructural, a su versatilidad por la diversidad de formas que puede adoptar, a su función para uso estructural como no estructural y a su economía en términos de fabricación. Es por ello que con la finalidad de obtener un concreto con las propiedades requeridas, en cada uno de sus tres estados, como de apariencia, de durabilidad, de resistencia, de estabilidad de volumen y entre otras, es necesario reconocer sus componentes y las propiedades de cada uno de ellos, para comprender de qué manera su condición favorece o no las propiedades finales del concreto.

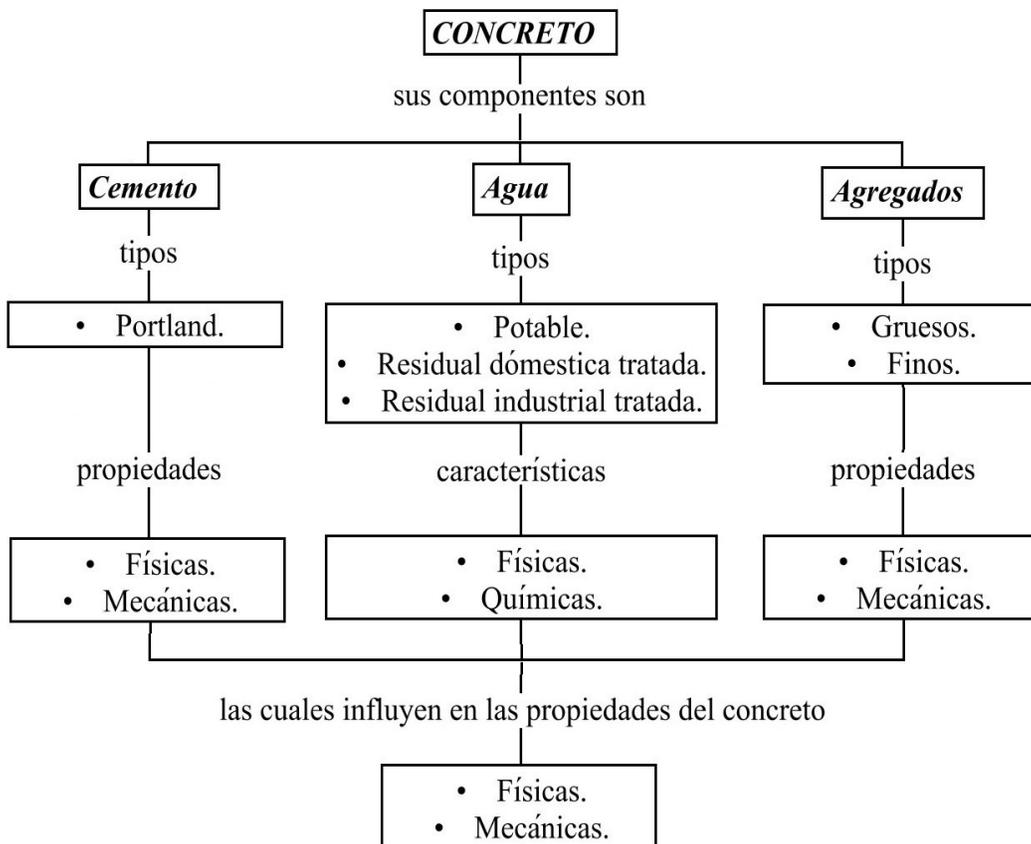


Figura 1 Estructura del concreto.

Fuente: Autor.

3.1. Concreto

Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanes (2004) afirman que el concreto es la mezcla de dos componentes la pasta y los agregados, que constituyen alrededor del 12% al 40% y del 60% al 75% del volumen total del concreto, respectivamente. La pasta está compuesta en un 7% a 15% de cemento portland, en un 14% a 21% de agua y en un 1% a 8% de aire, y los agregados que se distribuyen en un 24% a 30% de agregado fino y en un 31% a 51% de agregado grueso. Como se evidencia en la Figura 2 las proporciones empleadas de cada componente están en función del tipo de mezcla que representan, es decir, las mezclas 1 y 3 son ricas y están compuestas por agregados finos y gruesos de tamaño pequeño, mientras que las mezclas 2 y 4 son pobres y están compuestas por agregados gruesos de tamaño grande.

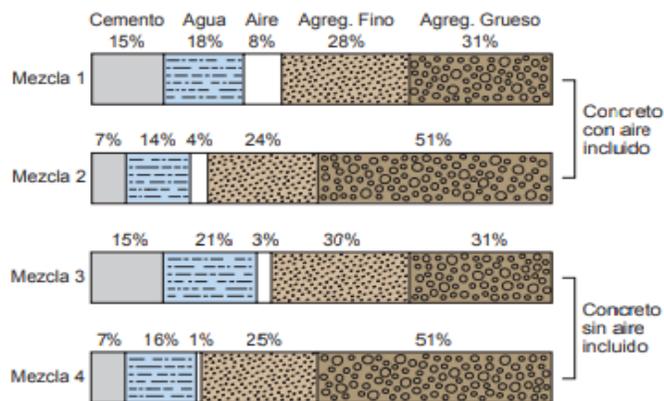


Figura 2 Proporciones empleadas en las mezclas de concreto en volumen absoluto.

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

El concreto tiene propiedades físicas y mecánicas que están sujetas a las condiciones en las que se encuentra y se evalúan mediante la realización de una serie de ensayos sobre el concreto. Como es sabido el concreto se puede encontrar en tres (3) estados como lo son en estado fresco, en proceso de fraguado y en estado endurecido para los cuales presenta propiedades específicas que se describen en la Figura 3, en la Figura 4 y en la Figura 5:

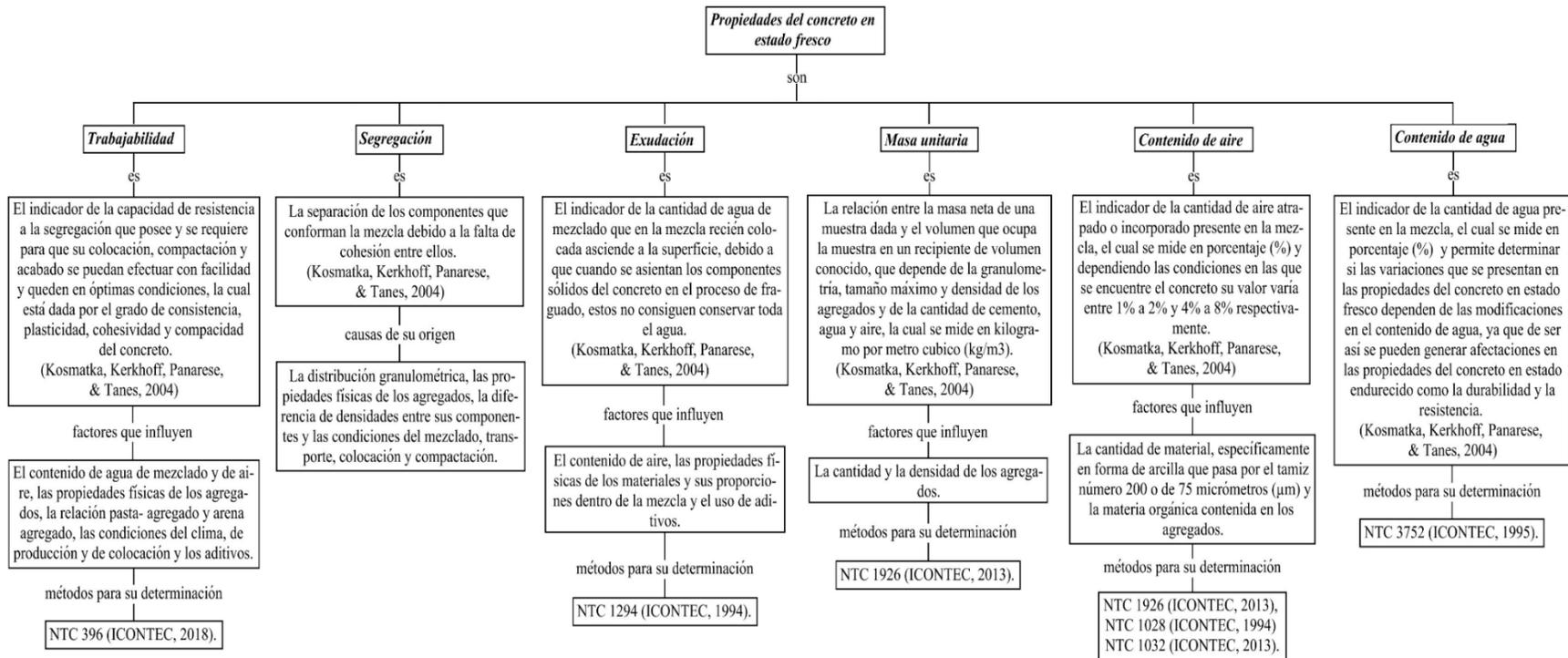


Figura 3 Propiedades del concreto en estado fresco.

Fuente: Autor.

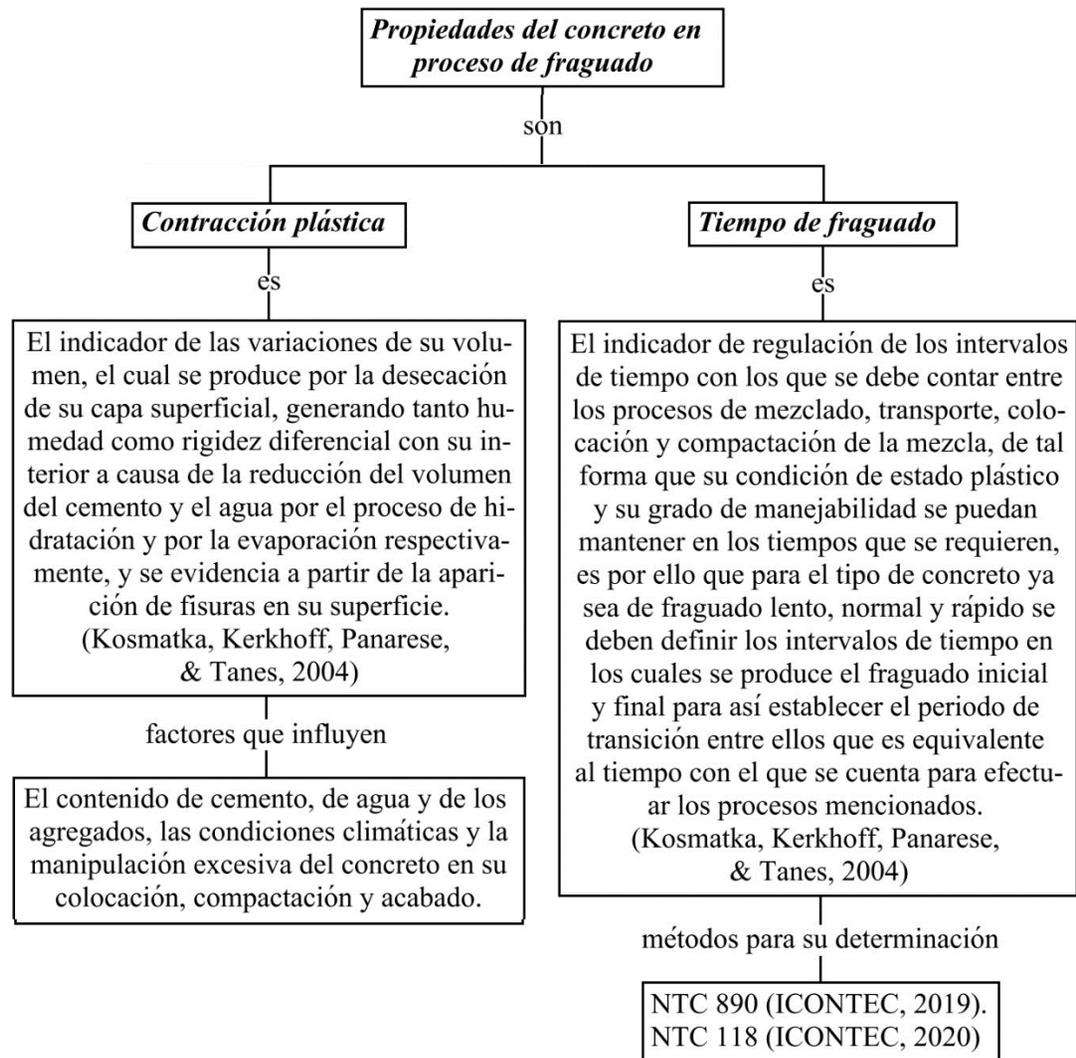


Figura 4 Propiedades del concreto en proceso de fraguado.

Fuente: Autor.

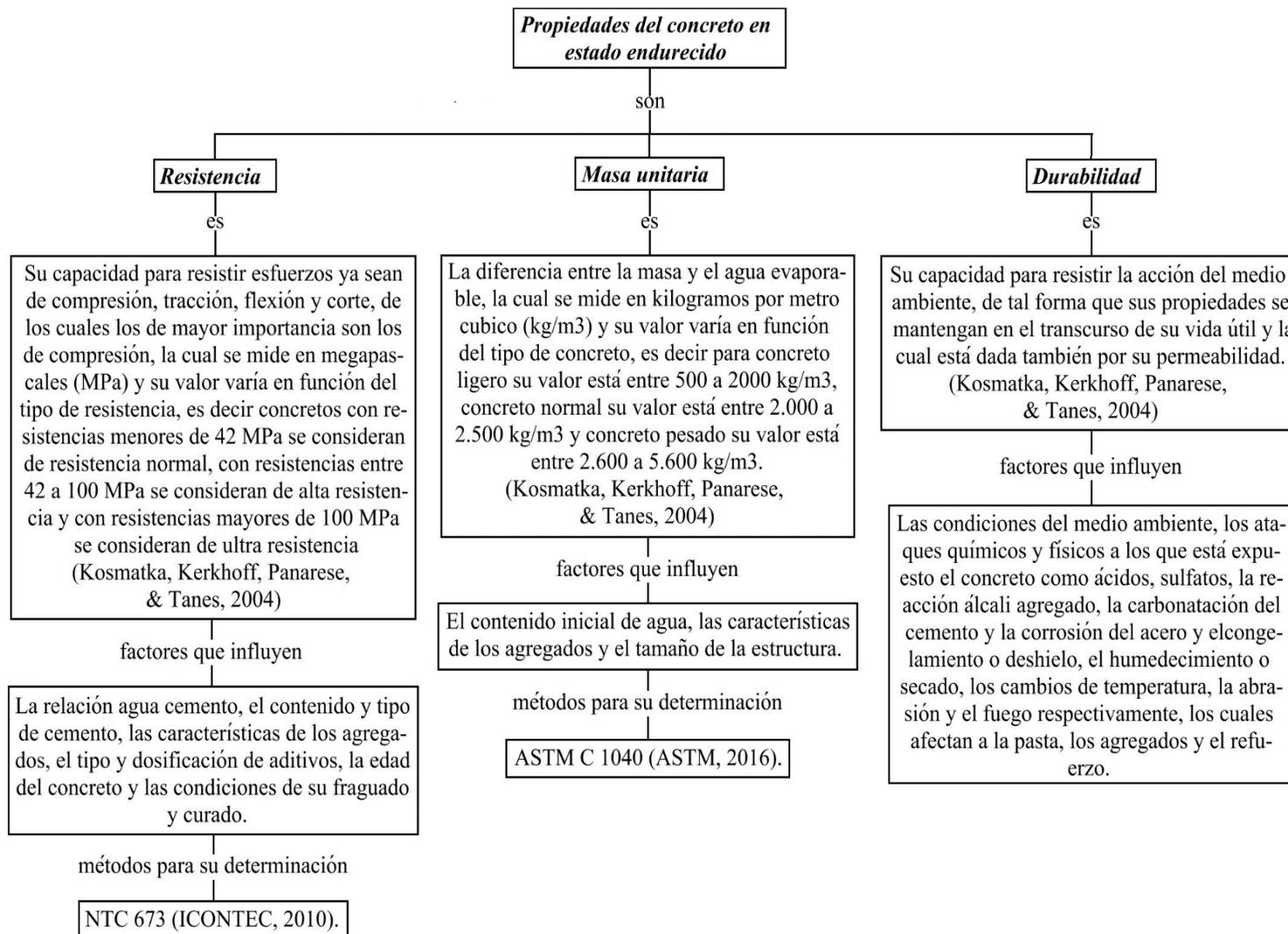


Figura 5 Propiedades del concreto en estado endurecido.

Fuente: Autor.

3.2. Cemento portland

El cemento es un material aglomerante fabricado a partir de materiales minerales calcáreos, tales como cal, sílice y alúmina, y óxido de hierro. El cemento es uno de los componentes que se emplea en procesos para la fabricación de concreto, ya que al combinarse con el agua producen una reacción química denominada hidratación y conforman la pasta, que al unirse con los agregados pétreos, debido a sus propiedades de adhesión y cohesión, forman el concreto, el cual posteriormente fragua, se endurece y se vuelve más resistente en condiciones propicias tanto de humedad como de temperatura cuando continua la hidratación con el curado.

Como lo establece la norma NTC 121 (ICONTEC, 2014) existen ocho tipos de cemento portland, los cuales se exponen en la Tabla 1:

Tabla 1 Clasificación del cemento portland.

Tipo de cemento	Características
Tipo UG	Uso general.
Tipo ART	De alta resistencia temprana.
Tipo MRS	De moderada resistencia a los sulfatos.
Tipo ARS	De alta resistencia a los sulfatos.
Tipo MCH	De moderado calor de hidratación.
Tipo BCH	De bajo calor de hidratación.
Opción BRA	De baja reactividad con agregados reactivos Alkali – Sílice.
Opción A	Con incorporadores de aire.

Fuente: Autor.

El cemento tiene propiedades físicas y mecánicas que están sujetas a las condiciones en las que se encuentra y se evalúan mediante la realización de una serie de ensayos sobre el cemento, la pasta de cemento y el mortero. Estas propiedades se describen en la Figura 6:

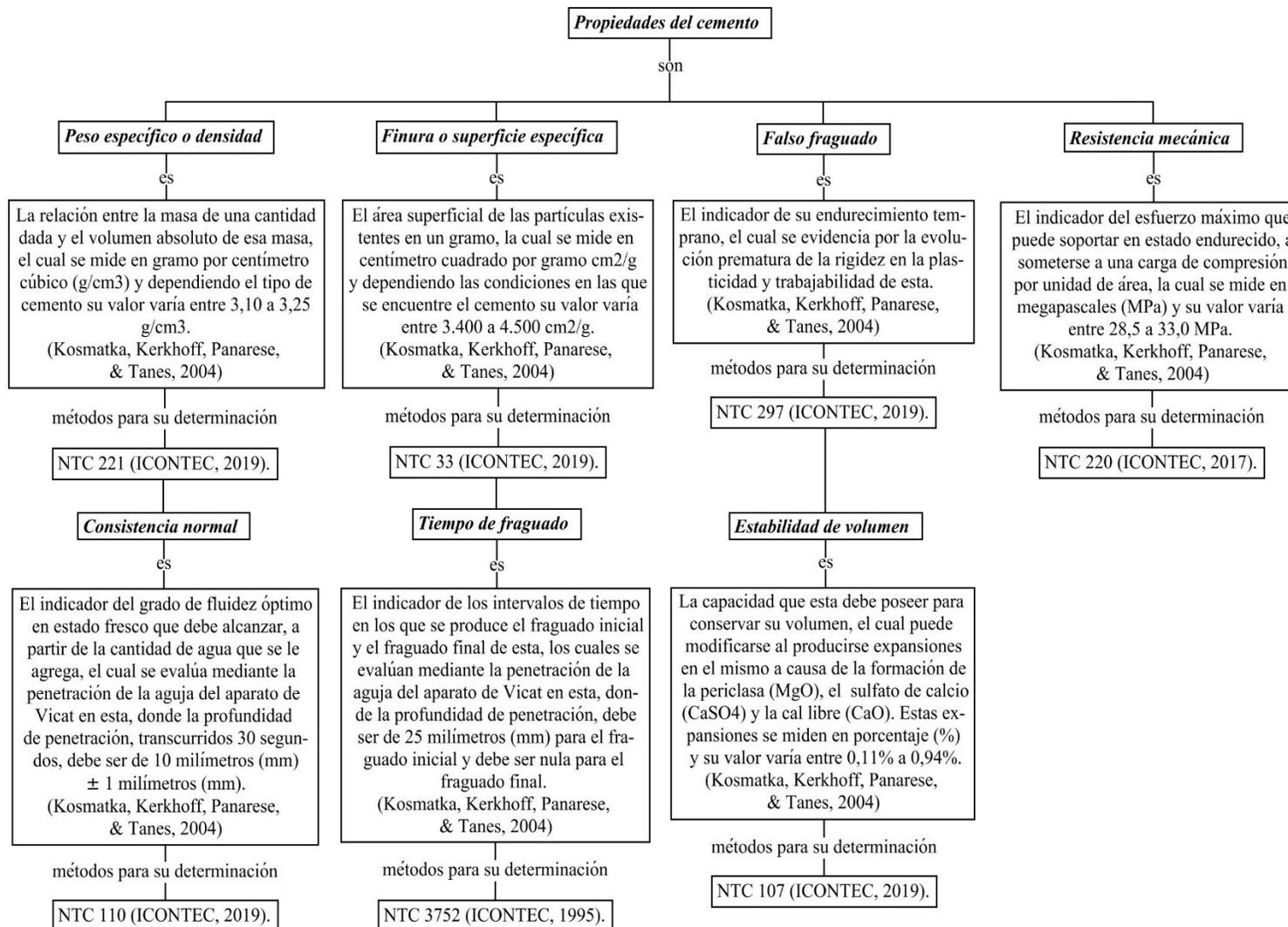


Figura 6 Propiedades del cemento.

Fuente: Autor.

3.3. Agua

El agua es una sustancia líquida que no presenta características de olor, sabor y color de la cual, como lo afirma el FCEA (2017), se tiene disponible en el planeta alrededor de 1,386 millones de kilómetros cúbicos (km³), de los que el 97,5% corresponde a agua salada y el 2,5% restante a agua dulce. De esta última, se tiene que el 70% son glaciares, hielo y nieve, el 30% son aguas subterráneas inaccesibles y menos del 1% es agua disponible tanto para los ecosistemas como el consumo humano. El agua es uno de los componentes que se emplea en procesos para la fabricación de concreto, ya que en primer lugar, como se mencionó previamente, genera el proceso de hidratación del cemento cuando se utiliza como agua de mezclado y en segundo lugar le permite al concreto desarrollar propiedades como resistencia, durabilidad, apariencia adecuada, entre otras, cuando se utiliza como agua de curado.

El agua a emplear para la elaboración de concreto puede captarse y obtenerse de diferentes fuentes, por lo tanto, ya sean aguas naturales o efluentes de uso doméstico e industrial, pueden contener características tales como elementos, sustancias, microorganismos y compuestos químicos. Es por ello que posterior a su captación y aducción se deben someter a procesos de tratamiento de tipo físico, químico y biológico, los cuales consisten en un conjunto de operaciones unitarias o sistemas instalados con el propósito de modificar, reducir o eliminar la concentración de sus características físicas, químicas y microbiológicas indeseables o de contaminación.

Dentro de los procesos de tratamiento para aguas naturales se tienen Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), para aguas efluentes de uso doméstico se cuentan con Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR), y para aguas efluentes de uso industrial se disponen de Plantas de

Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI). Como ejemplo de estos procesos de tratamiento se tienen:

3.1.1. Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) El Gatillo de la Empresa Aguas de Facatativá E.A.F S.A.S E.S.P en el municipio de Facatativá.

El municipio de Facatativá cuenta con la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) El Gatillo de la Empresa Aguas de Facatativá E.A.F S.A.S E.S.P, ubicada, como se puede apreciar en la Figura 7, en la Carrera 1 Sur con calle 16. Esta planta potabiliza las aguas naturales superficiales y subterráneas, provenientes del Río Botello y la Quebrada Mancilla, mediante su captación a través de los embalses Gatillo 0, 1, 2 y 3, y así mismo de los pozos de San Rafael II y III, de Guapucha II y III, Deudoro Aponte, Cartagenita y Manabalanca, respectivamente, con la finalidad de modificar las concentraciones de sus características físicas, químicas y microbiológicas, a tal punto que sean inferiores a los valores máximos aceptables establecidos por la Resolución 2115 (MPS & MAVDT, 2007) y pueda emplearse para abastecer de agua potable a la población del casco urbano del municipio (Castañeda, 2015).



Figura 7 Ubicación satelital de la Empresa Aguas de Facatativá E.A.F S.A.S E.S.P en el municipio de Facatativá.

Fuente: Google Earth.

El proceso de tratamiento está dado por el funcionamiento de las operaciones unitarias expuestas en la Figura 8:

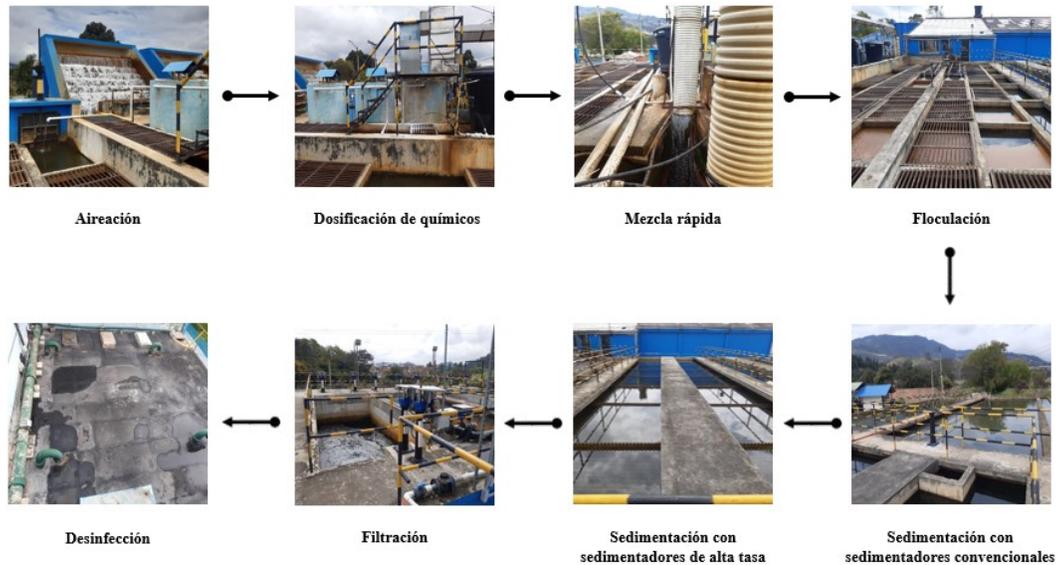


Figura 8 Esquema de funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) El Gatillo.

Fuente: Autor.

El proceso de tratamiento del agua inicia con su paso por la aireación en donde el hierro presente, al entrar en contacto con el aire, se oxida y adicionalmente que gases como el ácido sulfhídrico (H_2S) y el dióxido de carbono (CO_2) se reducen. Posteriormente se dirige al canal de quietamiento que conduce a los tanques de dosificación de químicos, específicamente óxido de calcio, para realizar la estabilización del pH. Seguidamente a través de la coagulación con la dosificación de sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) y mediante la mezcla rápida con un mezclador hidráulico por turbulencia se desestabilizan los coloides y se forman flocs fácilmente sedimentables. Después por medio de la floculación por agitación lenta prolongada los flocs se aglomeran y por consiguiente incrementan su tamaño y aumentan su densidad. Luego con la ayuda de la sedimentación tanto con los sedimentadores convencionales como con los de alta tasa, los flocs se separan del agua debido a que por su tamaño y peso se decantan dentro de ellos.

En seguida gracias a la filtración por medios porosos se remueven los microorganismos y los flocs muy finos que lograron pasar por la sedimentación. Por último mediante la desinfección con gas cloro se destruyen los microorganismos que posterior a la filtración aún se encuentran presentes.

3.1.2. Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) FAFÁ en el asentamiento Yerbabuena en el municipio de Facatativá.

El asentamiento Yerbabuena del municipio de Facatativá cuenta con el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) La Yerbabuena, ubicado, como se puede apreciar en la Figura 9, en la Vereda La Tribuna. Este sistema trata las aguas efluentes de uso doméstico provenientes de las 97 viviendas existentes en el asentamiento, con el objeto de remover, en la medida de lo posible, la mayor cantidad de concentraciones de las características físicas y biológicas presentes, antes de generar el vertimiento en el Río Andes.



Figura 9 Ubicación satelital del STAR en el asentamiento Yerbabuena en el municipio de Facatativá.

Fuente: Google Earth.

El proceso de tratamiento está dado por el funcionamiento de las instalaciones expuestas en la Figura 10:



Figura 10 Esquema de funcionamiento del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) La Yerbabuena. .

Fuente: Autor.

El proceso de tratamiento del agua inicia con su paso por una cámara de entrada que la dirige al tanque séptico en donde por procesos físicos y bioquímicos se descompone la materia orgánica convirtiéndose en líquidos, sólidos y gases, que más adelante mediante sedimentación y flotación se separan formando una serie de capas, la inferior de lodos, la intermedia líquida y la superior de natas. Posteriormente la capa intermedia líquida fluye hacia el filtro anaeróbico de flujo ascendente y a través de su lecho filtrante cubierto con un manto biológico se degrada la materia orgánica. Al final con la ayuda de pozos de inspección y una estructura de descole se conduce a su punto de vertimiento.

3.1.3. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI) de la Empresa INDALPE LTDA en el municipio de Facatativá.

La empresa INDALPE LTDA del municipio de Facatativá cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI) INDALPE, ubicada, como se puede apreciar en la Figura 11, en la Vereda Los Manzanos. Esta planta trata las aguas efluentes de sus procesos como el tratamiento de desechos orgánicos y la producción de harina de carne proteica para animales, con el propósito de modificar las concentraciones de sus características físicas y químicas para reutilizarlas en otro tipo de actividades y de esta manera no generar vertimientos de tipo industrial.



Figura 11 Ubicación satelital de la Empresa INDALPE LTDA en el municipio de Facatativá.

Fuente: Google Earth.

El proceso de tratamiento está dado por el funcionamiento de las operaciones unitarias expuestas en la Figura 12:

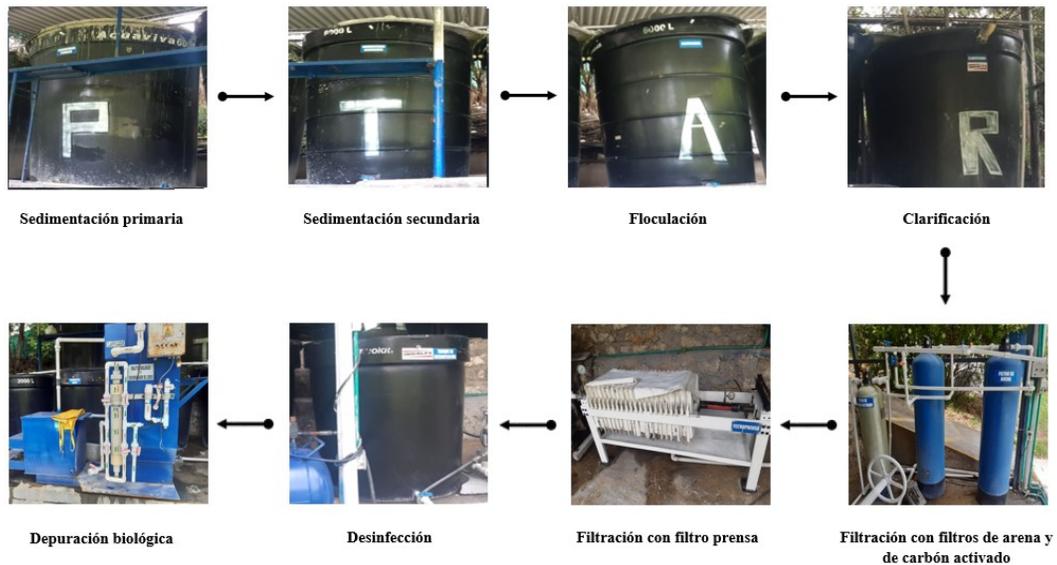


Figura 12 Esquema de funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Industrial (PTARI) INDALPE.

Fuente: Autor.

El proceso de tratamiento del agua inicia con la sedimentación primaria en donde se evacua la mayor parte posible de materia sólida remanente y se asientan las partículas más

pequeñas. Posteriormente se dirige a la sedimentación secundaria en la cual se acumulan y se asientan tanto los residuos sólidos como los microorganismos. Seguidamente a través de la floculación y la clarificación y con la ayuda de coagulantes se desestabilizan y se aglomeran las partículas sólidas con el fin de remover la turbiedad y el color. Después por medio de la filtración tanto con el filtro de arena como con el de carbón activado se retienen las partículas en suspensión más finas y se eliminan los compuestos orgánicos respectivamente. Enseguida gracias a la desinfección se eliminan los microorganismos que aún se encuentran presentes. Finalmente mediante el reactor biológico y el sedimentador de lodos se destruyen los materiales degradables y de mal olor de los lodos resultantes de la sedimentación primaria y secundaria.

Así pues, como lo establece la norma NTC 3459 (ICONTEC, 2001), el agua a emplear para la elaboración de concreto debe ser de apariencia clara, limpia y libre de sustancias en sí o cantidades de estas perjudiciales, que le aporten olor, sabor y color inusuales. A partir de esto, se puede inferir que el tipo de agua apta a emplear en este proceso es potable, en virtud de la calidad de sus características físicas, químicas y microbiológicas, sin embargo se pueden emplear en este proceso otros tipos de agua que no se consideran potables, siempre y cuando los contenidos totales de las concentraciones obtenidas de sus características al evaluarlas, se encuentren dentro de los valores máximos recomendados de concentraciones tolerables establecidos por la norma NTC 3459 (ICONTEC, 2001) para el agua de mezcla.

El agua tiene características físicas y químicas que están sujetas a las condiciones en las que se encuentra, se evalúan mediante la realización de una serie de ensayos sobre el agua y se miden en miligramos por litro (mg/l) o partes por millón (ppm). Estas características se describen en la Figura 13:

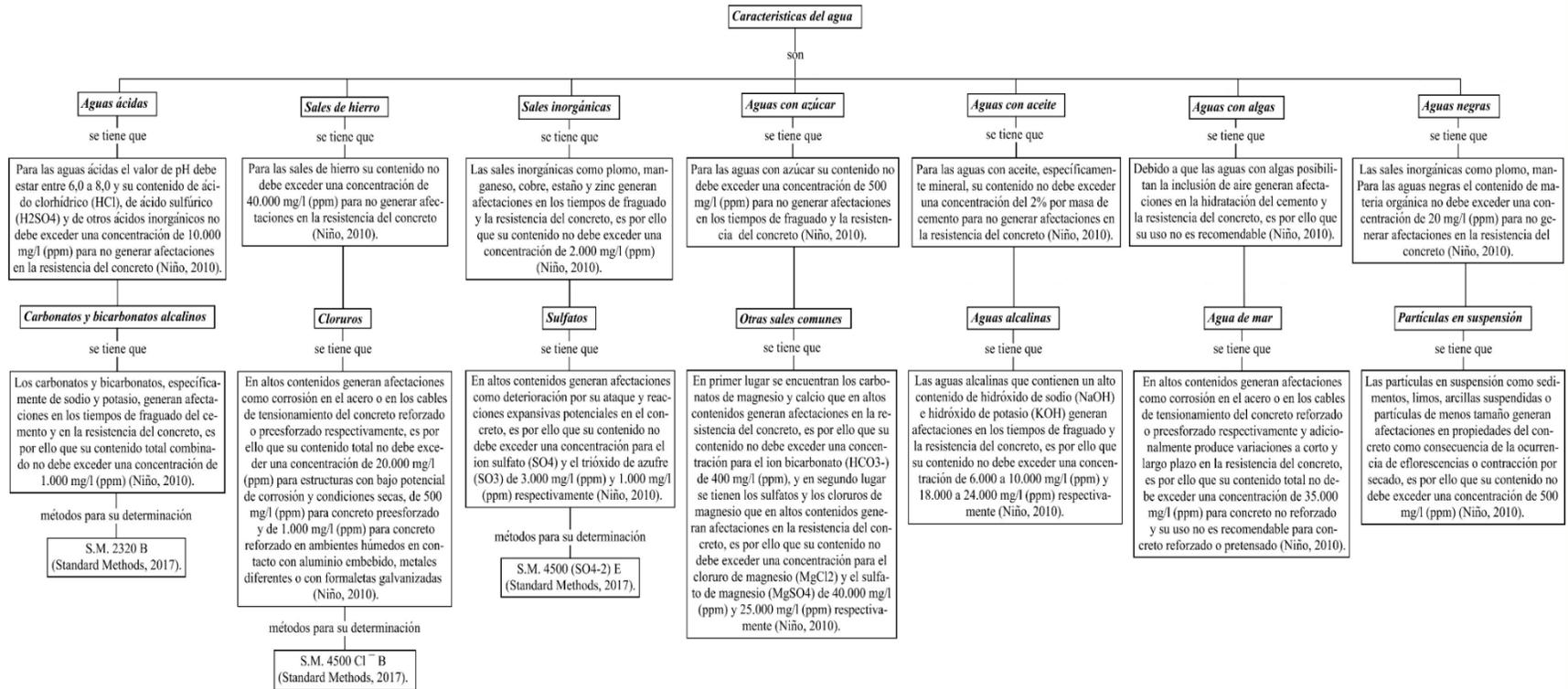


Figura 13 Características del agua.

Fuente: Autor.

3.4. Agregados

Los agregados gruesos y finos son aquellos materiales que generalmente consisten en grava y arena natural respectivamente. Los agregados son uno de los componentes que se emplea en procesos para la fabricación de concreto, ya que en virtud de la adherencia que desarrollan al combinarse con la pasta, forman el concreto que tanto en estado fresco como en estado endurecido desarrolla propiedades que dependen de las propiedades de estos. Los agregados se pueden clasificar a partir de tres aspectos, el primero es según su procedencia que puede ser de fuentes naturales o de procesos industriales, el segundo es según su tamaño en milímetros (mm) que para el agregado grueso varía entre 4,76 a 152,4 mm y para el agregado fino varía entre 0,074 a 4,76 mm, y el tercero es según su densidad que, como lo afirma Sánchez (2001), depende de la relación de la cantidad de masa por unidad de volumen y su valor varía en función del tipo de concreto y su utilización, es decir, para concreto ligero su valor está entre 480 a 1.300 kg/m³, concreto normal su valor está entre 1.300 a 2.000 kg/m³ y concreto pesado su valor está entre 2.000 a 5.600 kg/m³.

Los agregados tienen propiedades físicas y mecánicas que están sujetas a las condiciones en las que se encuentran y se evalúan mediante la realización de una serie de ensayos sobre los agregados. Estas propiedades se describen en la Figura 14:

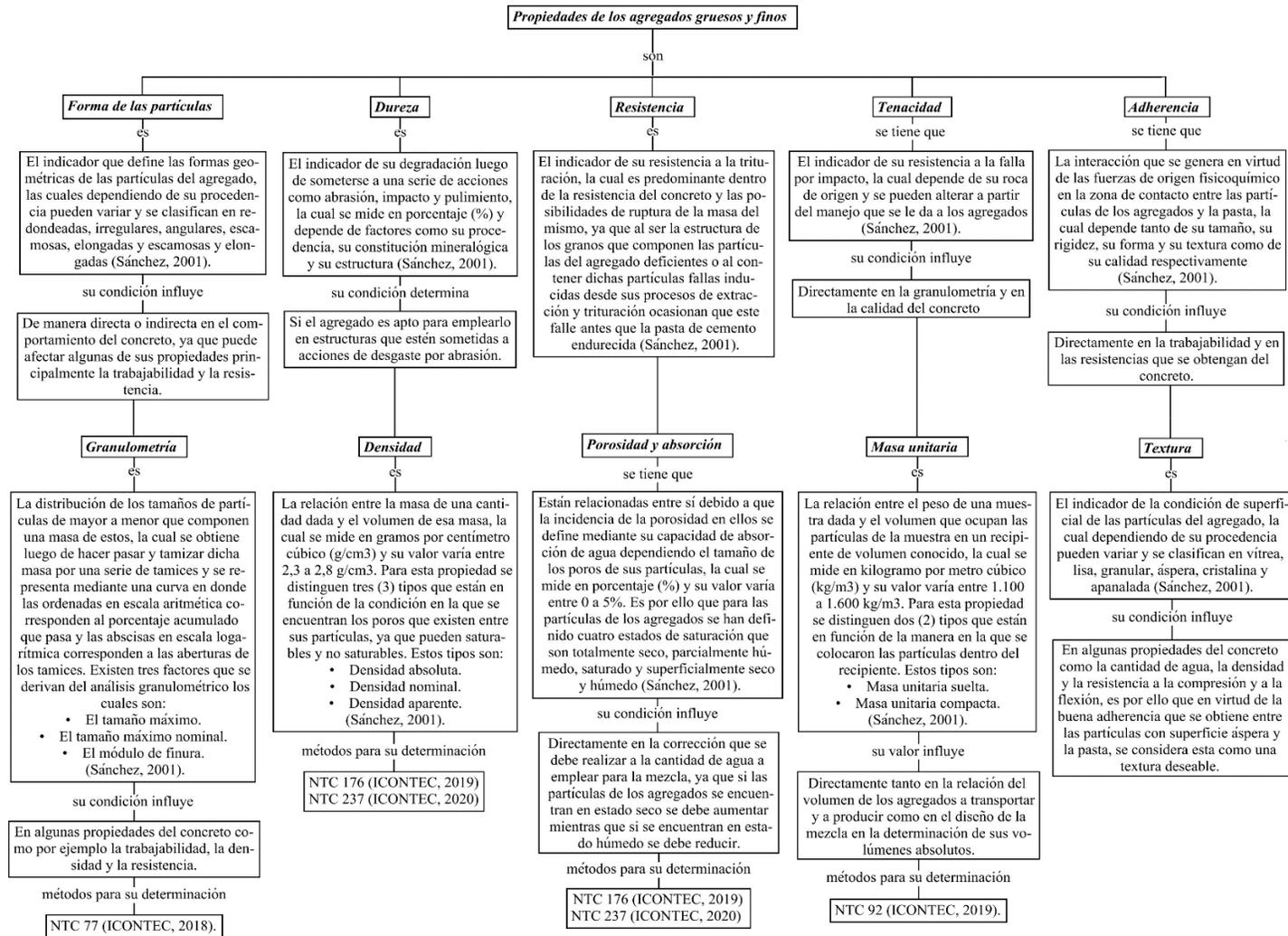


Figura 14 Propiedades de los agregados gruesos y finos.

Fuente: Autor.

4. ESTADO DEL ARTE

Teniendo en cuenta el objeto de estudio del presente proyecto que tiene como propósito la evaluación de la resistencia a la compresión de especímenes de concreto elaborados con agua potable y aguas residuales tratadas de tipo doméstico e industrial, mediante las consultas realizadas en diferentes bases de datos como Scopus y Science direct, empleando como palabras clave treated wastewater, reuse, concrete, compressive strength y como criterios de búsqueda article title, abstract, keywords, se identificaron una serie de artículos de investigación para los cuales se tiene que:

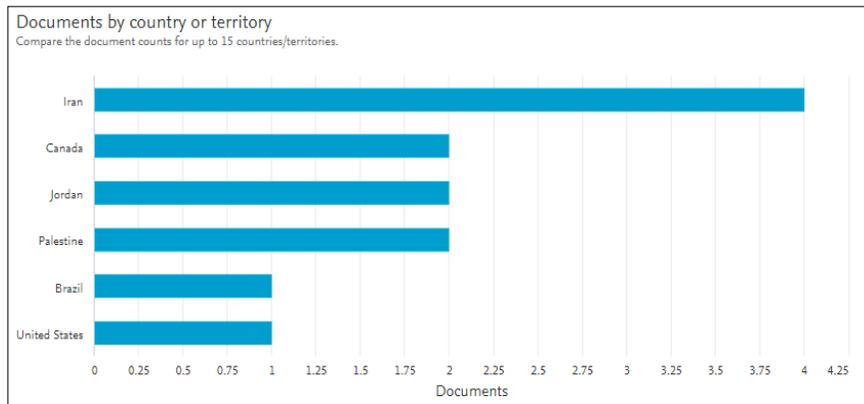


Figura 15 Documentos por país.

Fuente: Scopus.

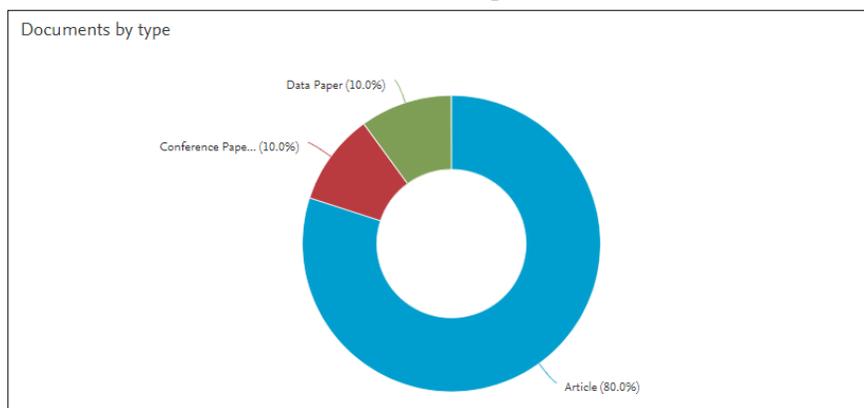


Figura 16 Documentos por tipo.

Fuente: Scopus.

Con base en la Figura 15 y la Figura 16 anteriormente relacionadas y a partir de la información obtenida de la base de datos de Scopus, se infiere que en los últimos 6 años (2015 a 2020), en países como Irán, Canadá, Jordania, Palestina, Brasil y EE. UU, se han llevado a cabo diferentes investigaciones relacionadas, sobre las cuales se han realizado diversos tipos de publicaciones como artículos de revista, periódicos y actas de conferencia. En la Tabla 2 se enlistan dichas investigaciones:

Tabla 2 Artículos de investigación de Scopus.

No.	País	VARIABLES DE ESTUDIO	Referencia
1	Irán. Canadá.	Asentamiento, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión y a la tracción.	(Asadollahfardi, Delnavaz, Rashnoiee, Fazeli, & Gonabadi, 2016)
2	Palestina.	Relaciones de agua cemento, trabajabilidad, absorción natural de agua y resistencia a la compresión.	(Al-Joulani, 2019)
3	Irán.	Densidad, resistividad eléctrica, tiempo de fraguado y resistencia a la compresión.	(Asadollahfardi & Mahdavi, 2019)
4	Canadá.	Durabilidad y resistencia a la compresión.	(Ahmed, R. y Afifi, M., 2019)
5	Jordania.	Trabajabilidad, tiempo de fraguado y resistencia a la compresión.	(Ghraid, A.M. y Al-Mashaqbeh, O., 2016)
6	Brasil.	Resistencia a la compresión.	(Ghraid & Al-Mashaqbeh, 2019)
7	Jordania. EE.UU.	Asentamiento, tiempo de fraguado y resistencia a la compresión.	(Ghraid, y otros, 2018)

No.	País	Variables de estudio	Referencia
8	Irán.	Asentamiento, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión y a la tracción.	(Asadollahfardi, Tahmasabi, Nabi, Pouresfandyani, & Hossieni, 2017)
9	Irán.	Tiempo de fraguado y resistencia a la compresión.	(Peighambarzadeh, Asadollahfardi, & Akbardoost, 2020)
10	Palestina.	Trabajabilidad, absorción natural de agua, resistencia a la compresión y a la tracción.	(Al-Joulani, 2015)

Fuente: Autor.

Después de realizar el análisis del enfoque de cada una de las investigaciones mencionadas en la Tabla 2, a continuación, se exponen brevemente los fundamentos y los resultados obtenidos de aquellas que están más acordes con el desarrollo de este proyecto.

- Al-Joulani (2019) analizan la implementación del uso de aguas residuales tratadas terciariamente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Nablus (NWWTP) en la elaboración de mezclas de concreto, con el fin de reemplazar el uso de agua potable en dichas y del mismo modo proliferar su uso y conservación en actividades solo de tipo doméstico. Es por ello que la investigación se centró en comparar la resistencia a la compresión a los 28 días y las propiedades del concreto, según el tipo de agua empleada en la mezcla, agua potable y aguas residuales tratadas, las relaciones de reemplazo de cada una y las relaciones agua cemento. Las muestras de concreto que se elaboraron para realizar estas comparaciones corresponden a mezclas con relaciones agua cemento (w/c) de 0.5, 0.6 y 0.7, con relaciones de reemplazo de 30%, 60% y 100% y con edades de curado de 7, 14 y 28 días. Los resultados establecen que se obtuvo un aumento de la resistencia a la compresión máxima en las muestras de concreto

elaboradas a partir de las mezclas con una relación agua cemento (w/c) de 0.5 y 0.6, mientras que se presentó una disminución en las elaboradas a partir de la mezcla con una relación agua cemento (w/c) de 0.7, y la relación de reemplazo recomendada de aguas residuales tratadas terciarias en las mezclas corresponde al 30% y al 40%.

- Ghrair & Al-Mashaqbeh (2019) presentan la sustitución parcial o total del agua potable por agua residual doméstica tratada para la elaboración de mezclas de concreto, dado que su principal enfoque está en proporcionar alternativas encaminadas a una economía sostenible del agua. A raíz de esta iniciativa se elaboraron 10 muestras de concreto, a partir de mezclas con una combinación de agua potable y aguas residuales domésticas tratadas en diferentes proporciones que corresponden a 0%, 50%, 75% y 100% de aguas residuales domésticas tratadas, con la finalidad de evaluar la resistencia a la compresión a los 28 días y la calidad del concreto. Los resultados establecen que las muestras de concreto elaboradas solo con aguas residuales domésticas tratadas no variaron significativamente la resistencia a la compresión sino que además aumento en 17.7% con base en aquellas con 50% y 75% de agua potable.

- Peighambarzadeh, Asadollahfardi, & Akbardoost (2020) investigan la viabilidad de implementar el uso de nuevas fuentes de agua en la elaboración de mezclas de concreto, ya que se considera pertinente su estudio para la ejecución de proyectos de construcción de túneles y de presas. Por tal razón se elaboraron varias muestras de concreto, a partir de mezclas en las que se utilizaron 5 combinaciones de agua potable y de aguas residuales domésticas tratadas, con el propósito de determinar la resistencia a la compresión a los 28 días del concreto. Los resultados establecen que las muestras de concreto elaboradas con aguas residuales domésticas tratadas, presentan diferencias entre el 2% y el 6% en la resistencia, la cual junto con el tiempo de fraguado aumentaron ligeramente en comparación con las de agua potable, lo que significa que

al emplear aguas residuales domésticas tratadas como agua de mezcla y de curado no genera efectos negativos.

A partir de la información obtenida de la base de datos de Science Direct, se tiene que en los últimos 6 años (2015 a 2020), en países como Pakistán, EE. UU, Sharjah e Irán, se han realizado investigaciones relacionadas, sobre las cuales se han realizado publicaciones, específicamente artículos de revista. En la Tabla 3 se enlistan dichas investigaciones:

Tabla 3 Artículos de investigación de Science Direct.

No.	País	VARIABLES DE ESTUDIO	Referencia
1	Pakistán. EE.UU.	Durabilidad (absorción de agua, ataque de ácido sulfúrico y penetración de cloruros), resistencia a la compresión y a la tracción dividida.	(Raza, y otros, 2020)
2	Sharjah.	Durabilidad (permeabilidad al cloruro, resistividad, contenido de cloruro), resistencia a la compresión y a la tracción.	(Ahmed, Alhoubi, Elmesalami, Yehia, & Abed, 2020)
3	Irán.	Resistencia a la compresión.	(Kaboosi & Emami, 2019)
4	Irán.	Asentamiento, absorción de agua, resistividad eléctrica superficial, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión y a la tracción.	(Asadollahfardi, Delnavaz, Rashnoiee, & Ghonabadi, 2015)

Fuente: Autor.

Luego de analizar el enfoque de cada una de las investigaciones mencionadas en la Tabla 3, a continuación, se describe brevemente el objeto de estudio y los resultados obtenidos de aquellas que son más relevantes para el desarrollo de este proyecto.

- Raza, y otros (2020) evalúan el rendimiento mecánico y la durabilidad del concreto, a partir de 5 de sus propiedades como la resistencia a la compresión y a la tracción dividida, y el impacto del ácido sulfúrico, absorción de agua, e infiltración y/o penetración de cloruro respectivamente. Por lo que se elaboraron muestras de concreto, a partir de mezclas en las que se usaron por separado 6 tipos de agua diferente, agua potable y 5 tipos de aguas residuales, las cuales corresponden a efluentes de fábricas textiles, de fábricas de fertilizantes, de alcantarillado doméstico, de estaciones de servicio y de las fábricas de azúcar. Los resultados establecen que en comparación con la mezcla elaborada con agua potable, para la mezcla elaborada con aguas residuales de fábricas textiles se obtuvieron las mayores resistencias tanto a la compresión (42,9 MPa) y a la tracción dividida (4,05 MPa) que corresponden al 119,49% y 116,29%, por otra parte para la mezcla elaborada con las aguas residuales de alcantarillado domestico se observó a los 90 días la máxima capacidad de absorción de agua aproximadamente de 120,65%, de la misma manera para la mezcla elaborada con aguas residuales de fábrica de fertilizantes se presentó a los 120 días el mayor porcentaje de pérdida de masa debido al ataque del 4% H₂ solución de SO₄ (18,69%) y a los 28 días la mayor penetración de cloruro de (15,71 mm) que corresponden a 124,93% y 122,78%.

- Asadollahfardi, Delnavaz, Rashnoiee, & Ghonabadi (2015) analizan el tiempo de fraguado, la resistencia a la compresión y a la tracción dividida y la durabilidad del concreto, a partir de 3 de sus propiedades como el asentamiento, la absorción de agua y la resistividad eléctrica superficial. Para ello se elaboraron muestras de concreto, a partir de mezclas con diferentes cantidades de cemento y de aditivo superplastificante, y con agua potable y aguas residuales tratadas, las cuales fueron curadas con aguas residuales tratadas antes de haber ingresado al proceso de cloración. Los resultados establecen que para todas las muestras el

tiempo de fraguado aumento en 15 minutos, la resistencia a la compresión y a la tracción corresponden y varían entre 93% a 96% y 96% a 100% respectivamente, y que para las muestras elaboradas y curadas con aguas residuales tratadas no se generaron afectaciones ni en el asentamiento, ni en la absorción de agua y ni en la resistividad eléctrica superficial.

- En Colombia Linares & Cerón (2016) evalúan los efectos del uso del agua residual doméstica tratada proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Cañaveralejo, en la elaboración de mezclas de concreto. Por tal razón se elaboraron muestras de concreto, a partir de mezclas con agua potable proveniente de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) El Tablazo, y con agua residual doméstica tratada, por separado y combinadas, con el objetivo de evaluar la resistencia a la compresión a los 28 días del concreto y además de determinar las concentraciones de los contaminantes que vienen en el agua residual doméstica tratada, para posteriormente contrastarlos con los valores límites permisibles que establece la norma NTC 3459 (ICONTEC, 2001). Los resultados establecen que en primer lugar del análisis del agua se obtuvo que todas las concentraciones estaban dentro de los límites con excepción de la materia orgánica la cual se denomina DQO y DBO y en segundo lugar de las muestras elaboradas con un 100% de agua residual doméstica tratada se obtuvieron resistencias del 90% respecto a la muestra con agua potable y por otra parte las muestras elaboradas con agua residual tratada diluida al 50% con agua potable obtuvieron un 100% de resistencia a la compresión respecto a la muestra con agua potable, de lo que se puede inferir que no afecta directamente la resistencia del concreto.

5. METODOLOGÍA

La evaluación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto simple elaborados a partir de agua potable y aguas residuales tratadas de tipo doméstico e industrial, consistió en someter los tres tipos de especímenes, con edades de ensayo diferentes, al ensayo descrito en la norma NTC 673 (ICONTEC, 2010) en el que se les aplica una carga axial de compresión a una velocidad de movimiento designada, la cual debe ser mantenida hasta que ocurre la falla o fisuración de los mismos, en donde se analiza la resistencia medida y se evalúa el cumplimiento de las especificaciones de diseño en términos de resistencia del concreto.

La metodología empleada se expone en la Figura 17:

5.1. Fase I: Caracterizar las muestras de agua para determinar los contenidos totales de constituyentes inorgánicos presentes en cada una.

- Determinación del contenido de cloruros en el agua por el método argentométrico descrito en la norma S.M. 4500 Cl^- B (Standard Methods, 2017).
- Determinación del contenido de sulfatos en el agua por el método turbidimétrico descrito en la norma S.M. 4500 (SO_4^{2-}) E (Standard Methods, 2017).
- Determinación del contenido de carbonatos y bicarbonatos en el agua por el método de titulación descrito en la norma S.M. 2320 B (Standard Methods, 2017).

5.2. Fase II: Caracterizar el agregado grueso y fino para determinar sus

propiedades físicas.

- Determinación de la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos y gruesos mediante un proceso de tamizado por el método descrito en la norma NTC 77 (ICONTEC, 2018).
- Determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en los agregados finos y gruesos por el método descrito en la norma NTC 92 (ICONTEC, 2019).
- Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso por el método descrito en la norma NTC 176 (ICONTEC, 2019).
- Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino por el método descrito en la norma NTC 237 (ICONTEC, 2020).
- Determinación de la densidad del cemento hidráulico por el método descrito en la norma NTC 221 (ICONTEC, 2019).

5.3. Fase III: Elaborar el diseño de la mezcla de concreto.

- Elaboración del diseño de la mezcla de concreto por el método ACI y de la Road Note Laboratory (RNL).

5.4. Fase IV: Elaborar y curar los especímenes cilíndricos de concreto

simple.

- Elaboración y curado de los especímenes cilíndricos de concreto simple mediante el método descrito en la norma NTC 1377 (ICONTEC, 2010).

5.5. Fase V: Evaluar la resistencia a la compresión de los especímenes

cilíndricos de concreto simple.

- Realización del ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto para su determinación mediante el método descrito en la norma NTC 673 (ICONTEC, 2010).

Figura 17 Metodología empleada para la evaluación de la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto.

Fuente: Autor.

5.1. Fase I: Caracterizar las muestras de agua para determinar los contenidos totales de constituyentes inorgánicos presentes en cada una.

5.1.1. Determinación del contenido de cloruros en el agua por el método argentométrico descrito en la norma S.M. 4500 Cl – B (Standard Methods, 2017).

La determinación del contenido de cloruros en muestras de agua que son relativamente claras y que en la porción titulada presentan de 0.15 a 10 miligramos (mg) de Cl^- , es posible mediante la aplicación del método argentométrico, el cual tiene como principio que para una solución ligeramente alcalina o neutra, la solución indicadora cromato de potasio (K_2CrO_4) con la solución titulante estándar nitrato de plata (AgNO_3) forman un precipitado amarillo rosáceo que indica el punto final de la titulación del cloruro.

Para la aplicación del método en la Tabla 4 se exponen los reactivos a preparar, junto con sus componentes y la cantidad requerida de cada uno.

Tabla 4 Reactivos empleados en el método argentométrico.

Reactivos	Compuestos	Cantidad
Solución indicadora cromato de potasio (K_2CrO_4).	Se disuelve en un poco de agua destilada el cromato de potasio (K_2CrO_4) y se agrega el nitrato de plata (AgNO_3). Se deja reposar por 12 horas (h) y se diluye hasta completar 1.000 mililitros (mL).	50 g de (K_2CrO_4). Hasta obtener un precipitado rojo g de (AgNO_3).
Cloruro de sodio normalizado (NaCl) (0,014 N).	Se disuelve en agua destilada el cloruro de sodio (NaCl) y se diluye hasta completar 1.000 mililitros (mL).	0.824 g de (NaCl)
Titulante estándar nitrato de plata (AgNO_3) (0,0141 N).	Se disuelve en agua destilada el nitrato de plata (AgNO_3) y se diluye hasta completar 1.000 mililitros (mL). Se normaliza en cloruro de sodio (NaCl).	2.395 g de (AgNO_3).

Fuente: Autor.

Inicialmente se toma una cantidad de 100 mL de la muestra y se prepara de tal forma que:

- Si la muestra está muy coloreada se agregan 3 mL de hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$).
- Si en la muestra hay presencia de tiosulfato, sulfuro o sulfito se agrega 1 mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2).
- Si el pH de la muestra no se encuentra dentro del rango de 7 a 10, se debe ajustar el pH con ácido sulfúrico (H_2SO_4) o hidróxido de sodio (NaOH).

Posteriormente se le agrega 1 mL de la solución indicadora cromato de potasio (K_2CrO_4), y se titula con la solución titulante estándar nitrato de plata (AgNO_3) hasta obtener un punto final amarillo rosáceo. Por último, se normaliza la solución titulante estándar nitrato de plata (AgNO_3) y se define el valor del reactivo blanco.

Al finalizar el ensayo, el contenido de cloruros en $\text{mg Cl}^- / \text{L}$ se determina mediante la siguiente expresión:

$$\text{mg de } \text{Cl}^- / \text{L} = \frac{(A - B) \times N \times 35.450}{\text{ml de muestra}}$$

Donde:

- A: mL de titulación de la muestra.
- B: mL de titulación de blanco.
- N: Normalidad de (AgNO_3).

5.1.2. Determinación del contenido de sulfatos en el agua por el método turbidimétrico descrito en la norma S.M. 4500 (SO_4^{2-}) E (Standard Methods, 2017).

La determinación del contenido de sulfatos en muestras de agua con un contenido de sulfatos de 1 a 40 miligramos por litro (mg/L), es posible mediante la aplicación del método turbidimétrico, el cual tiene como principio que el ion sulfato (SO_4^{2-}) se precipita como la

suspensión de sulfato de bario (BaSO_4) en un medio de ácido acético ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$) al añadir cloruro de bario (BaCl_2), la cual se coloca en la celda de absorción del fotómetro para la medición de la absorbancia de luz.

Para la aplicación del método en la Tabla 5 se exponen los reactivos a preparar, junto con sus componentes y la cantidad requerida de cada uno.

Tabla 5 Reactivos empleados en el método turbidimétrico.

Reactivos	Compuestos	Cantidad
Solución reguladora.	Se disuelven en 500 mililitros (mL) de agua destilada el cloruro de magnesio ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), el acetato de sodio ($\text{CH}_2\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), el nitrato de potasio (KNO_3) y el ácido acético (CH_3COOH) (99%) y se diluye hasta completar 1.000 mililitros (mL).	30 g de ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 5 g de ($\text{CH}_2\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 1 g de (KNO_3). 20 mL de (CH_3COOH) (99%)
Cloruro de bario (BaCl_2).	Cloruro de bario (BaCl_2).	Cristales de tamaño de malla 20 a 30.
Solución patrón de sulfato de ácido sulfúrico (H_2SO_4) o sulfato de sodio (Na_2SO_4).	Se diluye en agua destilada el ácido sulfúrico (H_2SO_4) hasta completar 100 mililitros (mL) o se diluye en agua destilada el sulfato de sodio (Na_2SO_4) hasta completar 1.000 mililitros (mL).	10,4 mL de (H_2SO_4). 0,147 g de (Na_2SO_4).

Fuente: Autor.

Inicialmente se preparan muestras patrón del ion sulfato (SO_4^{2-}) mediante la solución patrón de sulfato de ácido sulfúrico (H_2SO_4) o sulfato de sodio (Na_2SO_4) con incrementos de 5 mg/L en el rango de 0 a 40 mg/L de SO_4^{2-} , a las cuales se les agregan 20 mL de la solución reguladora y una cucharada de cristales de cloruro de bario (BaCl_2), se agitan a velocidad constante durante 60 ± 2 segundos (seg) y se colocan en la celda de absorción del fotómetro para medir la absorbancia de luz transcurridos $5 \pm 0,5$ minutos (min). Posteriormente las mediciones

de absorbancia obtenidas así como su correspondiente concentración en mg/L de SO_4^{-2} , se representan a través de una gráfica denominada curva de calibración en el eje de las abscisas y de las coordenadas respectivamente.

Seguido de esto se toma una cantidad de 100 mL de la muestra, se le agregan 20 mL de la solución reguladora y una cucharada de cristales de cloruro de bario ($BaCl_2$), se agita a velocidad constante durante 60 ± 2 segundos (seg) y se coloca en la celda de absorción del fotómetro para medir la absorbancia de luz transcurridos $5 \pm 0,5$ minutos (min). Al final, a partir de la medición de absorbancia obtenida se determina la concentración en mg/L de SO_4^{-2} mediante la ecuación de la recta de la curva de calibración.

Al finalizar el ensayo, el contenido de sulfatos en mg de SO_4^{-2} / L se determina mediante la siguiente expresión:

$$mg \text{ de } SO_4^{-2} / L = \frac{mg \text{ de } SO_4^{-2} \times 1.000}{ml \text{ de muestra}}$$

Donde:

- mg de SO_4^{-2} es la concentración obtenida de la ecuación de la recta de la curva de calibración.

5.1.3. Determinación del contenido de carbonatos y bicarbonatos en el agua por el método de titulación descrito en la norma S.M. 2320 B (Standard Methods, 2017).

La determinación del contenido de carbonatos y bicarbonatos de álcalis en muestras de agua, es posible mediante la aplicación del método de titulación, el cual tiene como principio que los iones hidroxilos presentes en el agua reaccionan al agregar una solución ácida como consecuencia de la disociación de los solutos, es decir, que una muestra en presencia de las soluciones indicadoras ácido base indica la cantidad de mililitros (mL) necesarios de la solución

ácida de ácido sulfúrico (H_2SO_4) o ácido clorhídrico (HCL) para neutralizar los iones carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-) presentes.

Para la aplicación del método en la Tabla 6 se exponen los reactivos a preparar, junto con sus componentes y la cantidad requerida de cada uno.

Tabla 6 Reactivos empleados en el método de titulación.

Reactivos	Compuestos	Cantidad
Solución de carbonato de sodio (Na_2CO_3) (0,05 N).	Se seca, se pesa y se disuelve con agua destilada el carbonato de sodio (Na_2CO_3) en un balón volumétrico de 1 litro (L) que se llena hasta la marca.	2,5 \pm 0,2 g de (Na_2CO_3).
Solución ácida (0,1 N) de ácido sulfúrico (H_2SO_4) o ácido clorhídrico (HCL).	Se prepara la solución ácida, se normaliza por titulación potenciométrica hasta un pH de 5 con la solución de (Na_2CO_3) (0,05 N) con 60 mL de agua destilada, se lleva a ebullición durante 3 a 5 minutos (min), se enfría a temperatura ambiente y se completa la titulación hasta el punto de inflexión del pH.	40 mL de (Na_2CO_3) (0,05 N).
Solución ácida (0,02 N) de ácido sulfúrico (H_2SO_4) o ácido clorhídrico (HCL).	Se diluye en agua destilada la solución ácida (0,1 N) hasta completar 1000 mililitros (mL) y se normaliza por titulación potenciométrica con la solución de (Na_2CO_3) (0,05 N) con 60 mL de agua destilada, se lleva a ebullición durante 3 a 5 minutos (min), se enfría a temperatura ambiente y se completa la titulación hasta el punto de inflexión del pH.	200 mL de la solución ácida (0,1 N). 15 mL de (Na_2CO_3) (0,05 N).
Solución indicadora de verde de bromocresol (indicador de pH 4,5).	Se disuelven en 100 mililitros (mL) de agua destilada el verde de bromocresol y la sal de sodio.	100 mg de verde de bromocresol.
Solución indicadora de púrpura de metacresol (indicador de pH 8,3).	Se disuelven en 100 mililitros (mL) de agua destilada el púrpura de metacresol.	100 mg de púrpura de metacresol.

Fuente: Autor.

Inicialmente con base en el valor de acidez de la muestra en miligramos de carbonato de calcio por litro ($\text{mg CaCO}_3/\text{L}$), se establece el tamaño de la muestra y la normalidad del titulante. El valor de acidez puede ser menor de $1.000 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$ para el cual como tamaño de muestra se usa una porción que contenga acidez equivalente a menos de $50 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$ y como normalidad del titulante de ácido sulfúrico (H_2SO_4) o ácido clorhídrico (HCL) se emplea de $0,02 \text{ N}$, o mayor de $1.000 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$ para el cual como tamaño de muestra se usa una porción que contenga acidez equivalente a menos de $250 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$ y como normalidad del titulante de ácido sulfúrico (H_2SO_4) o ácido clorhídrico (HCL) se emplea de $0,1 \text{ N}$. Seguido de esto se prepara la muestra de tal forma que:

- Si el pH de la muestra es mayor a $8,3$ se le agregan $0,2 \text{ mL}$ o 5 gotas de la solución indicadora de púrpura de metacresol y se agita hasta obtener un punto final rosáceo, se titula con la solución ácida $0,1 \text{ N}$ o $0,02 \text{ N}$ según corresponda y se agita hasta obtener un punto final incoloro. Posteriormente se le agregan $0,2 \text{ mL}$ o 5 gotas de la solución indicadora de verde de bromocresol y se agita hasta obtener un punto final amarillo, se titula con la solución ácida $0,1 \text{ N}$ o $0,02 \text{ N}$ según corresponda y se agita hasta obtener un punto final naranja.
- Si el pH de la muestra es menor a $8,3$ se le agregan $0,2 \text{ mL}$ o 5 gotas de la solución indicadora de purpura de metacresol y se verifica que no se obtiene un punto final rosáceo sino que se mantiene incoloro. Posteriormente se le agregan $0,2 \text{ mL}$ o 5 gotas de la solución indicadora de verde de bromocresol y se agita hasta obtener un punto final amarillo, se titula con la solución ácida $0,1 \text{ N}$ o $0,02 \text{ N}$ según corresponda y se agita hasta obtener un punto final naranja.

Al finalizar el ensayo, el contenido de alcalinidad en $\text{mg de CaCO}_3/\text{L}$ se determina mediante la siguiente expresión:

$$mg \text{ de } CaCO_3/L = \frac{A \times N \times 50.000}{ml \text{ de muestra}}$$

Donde:

- A: mL de la solución ácida utilizado.
- N: Normalidad de la solución ácida.

Se debe tener en cuenta que al agregar a la muestra la solución indicadora de púrpura de metacresol se está valorando la presencia de carbonatos (CO_3^{2-}) mientras que al agregar a la muestra la solución indicadora de verde de bromocresol se está valorando la presencia de bicarbonatos (HCO_3^-), es por ello que el volumen en mililitros (mL) de la solución ácida utilizado en la titulación de cada una de las soluciones indicadoras mencionadas corresponde a la alcalinidad de la fenolftaleína (P) y la alcalinidad total (T) respectivamente. A partir de esto se tiene que el contenido de carbonatos y bicarbonatos en mg de $CaCO_3/L$ se determina mediante las relaciones descritas en la Tabla 7:

Tabla 7 Relaciones de alcalinidad para la determinación del contenido de carbonatos y bicarbonatos.

Resultado de la titulación	Alcalinidad del carbonato como $CaCO_3$	Alcalinidad del bicarbonato como $CaCO_3$
P= 0	0	T
P < ½ T	2 P	T – 2 P
P = ½ T	2 P	0
P > ½ T	2 (T – P)	0
P = T	0	0

Fuente: (Standard Methods, 2017)

5.2. Fase II: Caracterizar el agregado grueso y fino para determinar sus propiedades físicas.

5.2.1. Determinación de la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados gruesos y finos mediante un proceso de tamizado por el método descrito en la norma NTC 77 (ICONTEC, 2018).

Para la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados gruesos y finos, inicialmente se toma una cantidad aproximada de 3.000 gramos (g) de la muestra y se pesa, luego se seca a temperatura uniforme de 100 ± 5 °C en un horno y se pesa. Posteriormente se lava con agua para eliminar totalmente de la superficie de las partículas de la misma tanto el polvo como otras sustancias adheridas, se seca a temperatura uniforme de 100 ± 5 °C en un horno y se pesa. Seguido de esto se toman para el agregado grueso y fino los tamices 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 8, N° 200 y fondo y 1/2", 3/8", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100, N° 200 y fondo respectivamente y se realiza un centrifugado manual para permitir que por cada uno de los tamices se distribuyan las partículas del agregado de acuerdo a su tamaño, forma y textura. Por último las partículas retenidas en cada uno de los tamices se pesan y se registran como pesos retenidos por tamiz.

Al finalizar el ensayo, se determinan:

- El tamaño máximo del agregado grueso que corresponden al tamiz por el que pasa el 100% del material.
- El tamaño máximo nominal del agregado grueso que corresponde al tamiz inmediatamente superior respecto a aquel donde el porcentaje retenido acumulado corresponde al 15% o más del material.
- La humedad natural de los agregados gruesos y finos mediante la siguiente expresión:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100$$

- El módulo de finura del agregado fino que corresponde a la sumatoria de los pesos retenidos acumulados comprendidos entre el tamiz por el que pasa el 100% del agregado y el tamiz N° 100, dividida en 100.

$$MF = \Sigma \% \text{ retenidos acumulados (1/2" - N° 100)}$$

- El porcentaje (%) retenido por cada tamiz mediante la siguiente expresión:

$$\% \text{ retenido} = \frac{P_4 \times 100}{P_2}$$

- El porcentaje (%) retenido acumulado por cada tamiz mediante la suma acumulativa de los porcentajes (%) retenidos por cada tamiz.

$$\% \text{ retenido acumulado} = P_{4-1} + P_{4-2}$$

- El porcentaje (%) pasa por cada tamiz mediante la diferencia entre 100 y el porcentaje (%) retenido acumulado por cada tamiz.

$$\% \text{ pasa} = 100 - \% \text{ retenido acumulado}$$

Donde:

- P₁: Peso inicial de la muestra (g)
- P₂: Peso de la muestra seca (g).
- P₃: Peso de la muestra lavada y seca (g).
- P₄: Pesos retenidos por tamiz (g).

5.2.2. Determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en los agregados finos y gruesos por el método descrito en la norma NTC 92 (ICONTEC, 2019).

Para la determinación de la masa unitaria en condición suelta y compacta de los agregados gruesos y finos, inicialmente se toman los moldes de 10 litros (L) y 3 litros (L) respectivamente, se pesan y se mide el diámetro y la altura de cada uno para calcular su volumen. Posteriormente para la determinación de la masa unitaria en condición suelta del agregado grueso y fino se deposita la muestra en el molde de 10 litros (L) o de 3 litros (L) según corresponda, hasta llenar completamente su superficie, se enraza y se pesa. Seguido de esto para la determinación de la masa unitaria en condición compacta del agregado grueso y fino se deposita la muestra en el molde de 10 litros (L) o de 3 litros (L) según corresponda, gradualmente cada 1/3 de la altura del mismo, ya que cada 1/3 se compacta con la varilla de apisonamiento con 25 golpes hasta llenar completamente su superficie, se enraza y se pesa. Al final el procedimiento se repite 3 veces.

Al finalizar el ensayo, la masa unitaria en condición suelta (MUS) y compacta (MUC) se determina mediante la siguiente expresión:

$$MUS \text{ o } MUC \text{ en } g/cm^3 = \frac{(M - M_{m+a})}{V}$$

Donde:

- M: Peso de los moldes de 10 litros (L) y 3 litros (L) según corresponda.
- V: Volumen de los moldes de 10 litros (L) y 3 litros (L) según corresponda.
- M_{m+a} : Peso del molde más el peso del agregado.

5.2.3. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso por el método descrito en la norma NTC 176 (ICONTEC, 2019).

Para la determinación de la densidad relativa y la absorción del agregado grueso, inicialmente se toma una cantidad aproximada de 5.000 gramos (g) de la muestra, se somete a un centrifugado manual para separar el polvo y se seca a temperatura uniforme de 100 ± 5 °C en un horno. Posteriormente se lava con agua para eliminar totalmente de la superficie de las partículas de la misma tanto el polvo como otras sustancias adheridas, se sumerge en agua durante 24 ± 4 horas (h), se remueve transcurrido ese periodo de tiempo y se secan las partículas sobre una toalla absorbente hasta eliminar la capa de agua superficial visible, y se pesa en el estado saturada y superficialmente seca (SSS). Seguido de esto se coloca en el interior de la canastilla metálica, se sumerge en un recipiente con agua y se pesa en la balanza hidrostática en el estado saturada. Finalmente se seca la muestra en el horno a temperatura uniforme de 100 ± 5 °C y se pesa en el estado seca.

Al finalizar el ensayo, la densidad relativa y la absorción se determinan mediante las siguientes expresiones:

- Densidad relativa (SH):

$$SH \text{ en } g/cm^3 = \frac{A}{(B - C)}$$

- Densidad relativa (SSS):

$$SSS \text{ en } g/cm^3 = \frac{B}{(B - C)}$$

- Densidad relativa aparente:

$$\text{Aparente en } g/cm^3 = \frac{A}{(A - C)}$$

- Absorción:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(B - A)}{A} \times 100$$

Donde:

- A: Peso de la muestra en el estado seca (g).
- B: Peso de la muestra en el estado saturada y superficialmente seca (SSS) (g).
- C: Peso de la muestra en el estado saturada (g).

5.2.4. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino por el método descrito en la norma NTC 237 (ICONTEC, 2020).

Para la determinación de la densidad relativa y la absorción del agregado fino, inicialmente se toma una cantidad aproximada de 500 gramos (g) de la muestra, se somete a un centrifugado manual para separar el polvo y se seca a temperatura uniforme de 100 ± 5 °C en un horno. Posteriormente se lava con agua para eliminar totalmente de la superficie de las partículas de la misma tanto el polvo como otras sustancias adheridas, se sumerge en agua durante 72 ± 4 horas (h) y se remueve transcurrido ese periodo de tiempo. Luego se extiende sobre una bandeja metálica, se expone a una corriente moderada de aire caliente y se agita constantemente de modo que se deseque de manera uniforme la superficie de las partículas y hasta que estas puedan fluir libremente.

Seguido de esto se somete al ensayo de humedad superficial, en donde se valora si la superficie de las partículas conserva aún exceso de humedad, para ello se toma el molde cónico, el cual se sujeta firmemente con su diámetro mayor apoyado sobre una superficie plana, y se introduce mediante un embudo y sin apelmazar en su interior una cantidad suficiente de la muestra que se apisona ligeramente con 25 golpes de la varilla. Después se levanta verticalmente

el molde y si el cono de agregado mantiene su forma original se tiene que la superficie de las partículas conserva aún exceso de humedad, mientras que si se produce un desmoronamiento superficial es un indicativo de que finalmente la superficie de las partículas ha alcanzado una condición de su estado saturada y superficialmente seca.

Luego se toma el picnómetro, se le añade agua hasta más o menos un 90 por ciento (%) de su capacidad y se pesa, se introducen en el 500 ± 10 gramos (g) de la muestra, se elimina el aire atrapado sobre una superficie plana agitando o invirtiendo el picnómetro si es preciso y se pesa. Por último se seca a temperatura uniforme de 100 ± 5 °C en un horno y se pesa en el estado seco.

Al finalizar el ensayo, la densidad relativa y la absorción se determinan mediante las siguientes expresiones:

- Densidad relativa (SH):

$$SH \text{ en } g/cm^3 = \frac{A}{(V - W)}$$

- Densidad relativa (SSS):

$$SSS \text{ en } g/cm^3 = \frac{500}{(V - W)}$$

- Densidad relativa aparente:

$$Aparente \text{ en } g/cm^3 = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)}$$

- Absorción:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(500 - A)}{A} \times 100$$

Donde:

- A: Peso de la muestra en el estado seca (g).
- V: Peso del picnómetro (g).
- V₁: Peso del picnómetro más agua (g).
- V₂: Peso del picnómetro más agua y más agregado (g).
- W: Peso de la muestra introducida en el picnómetro (V₂ - V₁) (g).

5.2.5. Determinación de la densidad del cemento hidráulico por el método descrito en la norma NTC 221 (ICONTEC, 2019).

Para la determinación de la densidad del cemento hidráulico, inicialmente se toma el frasco Le Chatelier y se llena el frasco de queroseno hasta un punto situado entre las marcas de 0 y 1 mililitros (mL) y se toma este valor como volumen inicial por medio de la curvatura del queroseno en el cuello del frasco, si es superior se toma por la secante y si es inferior se toma por la tangente. Seguido de esto se coloca un embudo en la parte superior del frasco para depositar dentro 64 gramos (g) de cemento, se coloca el tapón y se hace girar en una posición inclinada horizontalmente y suavemente en círculo con el propósito de liberar de aire el cemento hasta que ya no exista escape de burbujas hacia la superficie. Al final se deja reposar en ese estado durante 10 minutos (min) y se toma este valor como volumen final por medio de la curvatura del queroseno en el cuello del frasco si es superior se toma por la secante y si es inferior se toma por la tangente.

Al finalizar el ensayo, la densidad del cemento hidráulico se determina mediante la siguiente expresión:

$$\rho \text{ en } g/cm^3 = \frac{M_c}{(V_f - V_i)}$$

Donde:

- M_c : Peso del cemento (g).
- V_i : Volumen inicial de queroseno (cm^3).
- V_f : Volumen final de queroseno (cm^3).

5.3. Fase III: Elaborar el diseño de la mezcla de concreto.

5.3.1. Elaboración del diseño de la mezcla de concreto por el método de la Road

Note Laboratory (RNL).

Para la elaboración del diseño de la mezcla de concreto por el método de la Road Note Laboratory (RNL), se tiene que:

Inicialmente se deben conocer las siguientes propiedades de los agregados grueso y fino y del cemento:

- La granulometría y la humedad de los agregados grueso y fino, el tamaño máximo y el tamaño máximo nominal del agregado grueso y el módulo de finura del agregado fino.
- La masa unitaria en condición suelta y compacta de los agregados grueso y fino.
- La densidad relativa aparente y la absorción de los agregados grueso y fino.
- La densidad del cemento hidráulico.

Teniendo dichas propiedades el procedimiento de dosificación se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. La elección del asentamiento se realiza a partir de la consistencia, el grado de trabajabilidad, el tipo de estructura y las condiciones de colocación en las que se requiere el concreto y con base en la Tabla 8:

Tabla 8 Valores recomendados de asentamiento.

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de concreto)	Grado de trabajabilidad	Tipo de estructura y condiciones de colocación
0 – 2,0	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibraciones de formaleta.
2,0 – 3,5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados con máquina mecánica.
3,5 – 5,0	Semi – seca	Pequeño	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales.
5,0 – 10,0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados a mano. Columnas vigas, fundaciones y muros, con vibración.
10,0 – 15,0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactado con demasiada vibración.

Fuente: (Niño, 2010)

2. La elección del tamaño máximo nominal se realiza con base en la granulometría obtenida del agregado grueso.

3. La estimación del contenido o volumen de aire (V_a) se realiza a partir del tamaño máximo nominal y el grado de exposición al que estará sujeto el concreto y con base en la Tabla 9:

Tabla 9 Valores recomendados del contenido de aire.

Agregado grueso		Porcentaje promedio aproximado de aire atrapado	Porcentaje promedio total de aire recomendado para los siguientes grados de exposición		
Pulg	mm		Suave	Mediano	Severo
3/8	9,51	3,0	4,5	6,0	7,5

Agregado grueso		Porcentaje promedio aproximado de aire atrapado	Porcentaje promedio total de aire recomendado para los siguientes grados de exposición		
Pulg	mm		Suave	Mediano	Severo
1/2	12,50	2,5	4,0	5,5,	7,0
3/4	19,10	2,0	3,5	5,0	6,0
1	25,40	1,5	3,0	4,5	6,0
1 1/2	38,10	1,0	2,5	4,5	5,5
2	50,80	0,5	2,0	4,0	5,0
3	76,10	0,3	1,5	3,5	4,5
6	152,4	0,2	1,0	3,0	4,0

Fuente: (Niño, 2010)

4. La estimación del contenido de agua de mezclado (a) se realiza a partir asentamiento y el contenido o volumen de aire (V_a) al que estará sujeto el concreto y con base en la Tabla 10:

Tabla 10 Valores recomendados para el agua de mezclado.

Condición del contenido de aire	Asentamiento cm	Agua en kg/m ³ de concreto para los TMN del agregado indicados							
		10	12,5	20	25	40	50	70	150
Concreto sin aire incluido	3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
	8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
	15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	--
	Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin aire incluido, por ciento	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Concreto con aire incluido	3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
	8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
	15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	--
	Promedio recomendable de contenido total de aire por ciento	8	7	6	5	4,5	4	3,5	3

Fuente: (Niño, 2010)

Y el cálculo del volumen de agua de mezclado (V_w) se realiza mediante la siguiente expresión:

$$V_w = a/\gamma_w$$

Donde:

- a: Contenido de agua de mezclado (kg/m^3).
- γ_w : Densidad del agua (kg/m^3).

5. La elección de la relación agua/cemento (a/c) se realiza a partir de la resistencia de diseño f'_{cr} ($f'_{cr} = f'_c + 8,3$) y el contenido o volumen de aire (V_a) al que estará sujeto el concreto y con base en la Tabla 11:

Tabla 11 Valores recomendados para la relación agua/cemento (a/c).

Resistencia a la compresión a los 28 días en kg/cm^2 (psi)	Concreto sin inductor de aire Relación absoluta por peso	Concreto con inductor de aire Relación absoluta por peso
175 (2.500)	0,65	0,56
210 (3.000)	0,58	0,50
245 (3.500)	0,52	0,46
280 (4.000)	0,47	0,42
315 (4.500)	0,43	0,38
350 (5.000)	0,40	0,35

Fuente: (Niño, 2010)

6. El cálculo del contenido de cemento se realiza a partir del contenido de agua de mezclado (a) y de la relación agua/cemento (a/c) y mediante la siguiente expresión:

$$C = \frac{a}{a/c}$$

Donde:

- C: Contenido de cemento (kg/m^3).
- a: Contenido de agua de mezclado (kg/m^3).
- a/c : Relación agua/cemento.

Y el cálculo del volumen de cemento (V_c) se realiza mediante la siguiente expresión:

$$V_c = C/\gamma_c$$

Donde:

- C: Contenido de cemento (kg/m^3).
- γ_c : Densidad del cemento (kg/m^3).

7. La verificación de las especificaciones granulométricas de los agregados grueso y fino se realiza a partir de la comparación de la granulométrica obtenida con las recomendaciones granulométricas que establece la norma NTC 174 (ICONTEC, 2018) las cuales se exponen en la Tabla 12 y en la Tabla 13:

Tabla 12 Recomendaciones granulométricas para el agregado grueso.

Tamaño normal mm	Material que pasa cada uno de los siguientes tamices (porcentaje)												
	4"	3 1/2"	3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16
90,5 a 38,10	100	90 a 100		25 a 60		0 a 15		0 a 5					
64,0 a 38,10			100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5					
50,80 a 4,76				100	95 a 100		35 a 70		10 a 30		0 a 5		
38,10 a 4,76					100	95 a 100		35 a 70		10 a 30	0 a 5		
25,40 a 4,76						100	95 a 100		25 a 60		0 a 10	0 a 5	
19,00 a 4,76							100	90 a 100		20 a 55	0 a 10	0 a 5	
12,70 a 4,76								100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	
9,51 a 2,38									100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5
50,8 a 25,40				100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5				
38,1 a 19,00					100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5				

Fuente: (Niño, 2010)

Tabla 13 Recomendaciones granulométricas para el agregado fino.

Tamiz		% Pasa	
Mm	Pulgadas	Límite inferior	Límite superior
9,51	3/8	100	100
4,76	N° 4	95	100
2,38	N° 8	80	100
1,19	N° 16	50	85

Tamiz		% Pasa	
Mm	Pulgadas	Límite inferior	Límite superior
0,595	N° 30	25	60
0,297	N° 50	10	30
0,149	N° 100	2	10

Fuente: (Niño, 2010)

8. Si a partir de la verificación de las especificaciones granulométricas de los agregados grueso y fino se tiene que no cumplen con las recomendaciones granulométricas de la norma NTC 174 (ICONTEC, 2018), el procedimiento de dosificación se realiza por el método Road Note Laboratory (RNL). Para ello se debe optimizar la granulometría a partir de la selección de la especificación granulométrica de acuerdo con el tamaño máximo y con base en la Tabla 14:

Tabla 14 Rangos de valores granulométricos recomendados.

Tamiz		Límites de los porcentajes que pasan los siguientes tamaños máximos								
Pulg	Mm	90,6 mm 3 1/2"	76,1 mm 3"	64,0 mm (2 1/2)	50,8 mm (2")	38,1 mm (1 1/2")	25,4 mm (1")	19,00 mm (3/4")	12,7 mm (1/2")	9,51 mm (3/8")
3 1/2	90,6	100								
3	76,1	94 91	100							
2 1/2	64,0	89 83	94 91	100						
2	50,8	82 73	87 80	92 88	100					
1 1/2	38,1	74 62	78 68	83 75	90 85	100				
1	25,4	64 50	68 55	72 60	78 68	87 80	100			
3/4	19,0	58 42	62 47	65 51	71 58	78 68	90 85	100		
1/2	12,7	50 34	53 37	57 41	62 47	68 55	78 68	87 80	100	
3/8	9,51	45 29	48 32	51 35	56 40	62 47	71 58	78 68	90 85	100
N° 4	4,76	36 20	38 22	40 24	44 27	48 32	56 40	62 47	71 58	78 68
N° 8	2,36	28 13	30 15	32 16	34 18	38 22	44 27	48 32	55 40	61 46
N° 16	1,18	22 9	23 10	25 11	27 13	30 15	34 18	38 22	44 27	48 32
N° 30	600 μ	17 6	18 7	20 8	21 9	23 10	27 13	30 15	34 19	38 22
N° 50	300 μ	14 4	14 4	15 5	17 8	18 7	21 9	23 10	27 13	30 15
N° 100	150 μ	11 3	11 3	12 4	13 4	14 5	17 6	18 7	21 9	23 10

Fuente: (Niño, 2010)

9. Posteriormente se lleva a cabo el método gráfico realizando una gráfica con 10 divisiones tanto en ordenadas como en abscisas, en la que los ejes correspondientes a las ordenadas y a las abscisas se enumeran de 0 a 100 de abajo hacia arriba y de 0 a 100 el inferior de derecha a izquierda y el superior de izquierda a derecha, respectivamente. En el eje superior se representan los porcentajes de agregado fino mientras que en el eje inferior los porcentajes de agregado grueso. Seguido de esto se coloca la granulometría del agregado grueso y del agregado fino sobre el eje de las ordenadas correspondiente al 100 % de cada uno, y a partir de ello los puntos correspondientes a cada tamiz se unen mediante líneas inclinadas sobre las cuales se colocan los puntos correspondientes de la especificación granulométrica seleccionada de las recomendadas. Finalmente para dividir los puntos hallados en una proporción igual tanto a la izquierda como a la derecha se traza un eje vertical el cual corresponde a un porcentaje de agregado grueso y fino y representa la mezcla óptima.

10. El cálculo del volumen de los agregados grueso y fino (V_g) se realiza a partir del volumen de aire (V_a), de agua de mezclado (V_w) y de cemento (V_c) y mediante la siguiente expresión:

$$V_g = 1 - (V_a + V_w + V_c)$$

Donde:

- V_a : Volumen de aire (m^3/m^3)
- V_w : Volumen de agua de mezclado (m^3/m^3)
- V_c : Volumen de cemento (m^3/m^3)

Posteriormente se debe determinar la densidad aparente promedio de los agregados grueso y fino mediante la siguiente expresión:

$$d_{prom} = ((\%_f \times \gamma_f) + (\%_g \times \gamma_g))$$

Donde:

- d_{prom} : Densidad promedio de los agregados grueso y fino.
- γ_g y γ_f : Densidad aparente de los agregados grueso y fino respectivamente.
- %g y %f: Porcentaje de los agregados grueso y fino respectivamente obtenidos de la mezcla óptima.

Por último el contenido de los agregados grueso (W_g) y fino (W_f) se calcula mediante las siguientes expresiones respectivamente:

$$W_g = (d_{prom})x (V_g) x (\%g)$$

$$W_f = (d_{prom})x (V_f) x (\%f)$$

Donde:

- d_{prom} : Densidad promedio.
- V_g : Volumen de los agregados grueso y fino.
- %g y %f: Porcentaje de los agregados grueso y fino respectivamente obtenidos de la mezcla óptima.

11. El ajuste del contenido total de agua de mezclado (a_t) a partir de la humedad y la absorción de los agregados gruesos y finos, y mediante las siguientes expresiones:

$$H = \frac{M_h - M}{M}$$

Donde:

- H: Humedad de la muestra de los agregados.
- M_h : Peso de la muestra húmeda.
- M: Peso de la muestra seca.

$$Abs = \frac{M_{sss} - M}{M}$$

Donde:

- Abs: Absorción de la muestra de los agregados.
- M_h : Peso de la muestra seca superficialmente saturada y superficialmente seca.
- M: Peso de la muestra seca.

Por consiguiente el contenido de agua en exceso o libre de los agregados grueso y fino se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$A = M (H \pm Abs)$$

Al final el cálculo del contenido total de agua de mezclado (a_t) se realiza mediante la siguiente expresión:

$$a_t = a - (A_g + A_f)$$

Donde:

- a: Contenido de agua de mezclado (kg/m^3).
- A_g y A_f : Contenido de agua en exceso o libre de los agregados grueso y fino respectivamente.

12. Finalmente a partir del contenido total de agua de mezclado se realiza de nuevo el procedimiento de dosificación y se determinan las proporciones requeridas de los materiales para 1 m^3 de concreto.

5.4. Fase IV: Elaborar y curar los especímenes cilíndricos de concreto simple.

5.4.1. Elaboración y curado de los especímenes cilíndricos de concreto simple mediante el método descrito en la norma NTC 1377 (ICONTEC, 2010).

Para la elaboración de los especímenes cilíndricos de concreto simple, inicialmente se pesan las proporciones obtenidas en el diseño de mezcla del cemento, del agua y de los agregados gruesos y finos, los cuales se preparan de tal forma que se asegure una condición de humedad uniforme y permanente. Seguido de esto en la mezcladora se adicionan el agregado grueso con un poco de agua, se pone en funcionamiento y se adicionan el agregado fino, el cemento y el excedente de agua. Luego se mezclan durante 3 minutos (min), se dejan reposar durante 3 minutos (min) y se mezclan de nuevo durante 2 minutos (min).

Después de mezclado el concreto se toma una muestra del mismo y se mide el asentamiento con el Cono de Abrams que se humedece, se coloca en una superficie plana y húmeda, se sujeta firmemente con los pies, se llena con la muestra en tres capas iguales, las cuales corresponden cada una a un tercio del volumen del cono y se compactan por medio de una varilla con 25 golpes, y se afina la superficie superior enrasándola con la varilla de compactación. Seguido de esto se levanta el cono en dirección vertical y se mide la diferencia vertical entre la superficie superior de la muestra y del cono.

Posteriormente se toman los moldes cilíndricos, se llenan con el concreto en tres capas iguales, las cuales corresponden cada una a un tercio del volumen del cono y se compactan por medio de una varilla con 25 golpes, y se afinan las superficies superiores enrasándolas con la varilla de compactación.

Por último luego de fundidos los especímenes de concreto se cubren con una lona húmeda durante 24 horas (h), se retiran de los moldes cilíndricos transcurridas 24±8 horas (h) y se someten a curado mediante inmersión en tanques con agua durante 28 días.

5.5. Fase V: Evaluar la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto simple.

5.5.1. Realización del ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto para su determinación mediante el método descrito en la norma NTC 673 (ICONTEC, 2010).

Para la determinación de la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto simple, inicialmente se sacan de los tanques de curado y se mide el diámetro y la longitud de estos para determinar el área de la sección transversal. Seguido de esto se colocan en la máquina de compresión y se aplica la carga continuamente a velocidad de movimiento de 0,25±0,05 megapascales por segundo (MPa/seg) con incrementos controlados de velocidad de carga mayor, hasta que se aprecie en el indicador de carga que la carga empieza a decrecer constantemente y en el espécimen un patrón de fractura bien definido.

Al finalizar el ensayo, la resistencia a la compresión se determina mediante la siguiente expresión:

$$f'_c \text{ en MPa} = \frac{\text{Carga máxima (kN)} / 1000}{\text{Área sección transversal (m}^2\text{)}}$$

6. RESULTADOS

6.1. Fase I: Caracterizar las muestras de agua para determinar los contenidos totales de constituyentes inorgánicos presentes en cada una.

De la caracterización de las tres muestras de agua, agua potable, agua residual doméstica tratada y agua residual industrial tratada, las cuales se denominaron muestra 1, muestra 2 y muestra 3 respectivamente, en la que se analizan los contenidos totales de impurezas inorgánicas presentes en cada una se tiene que:

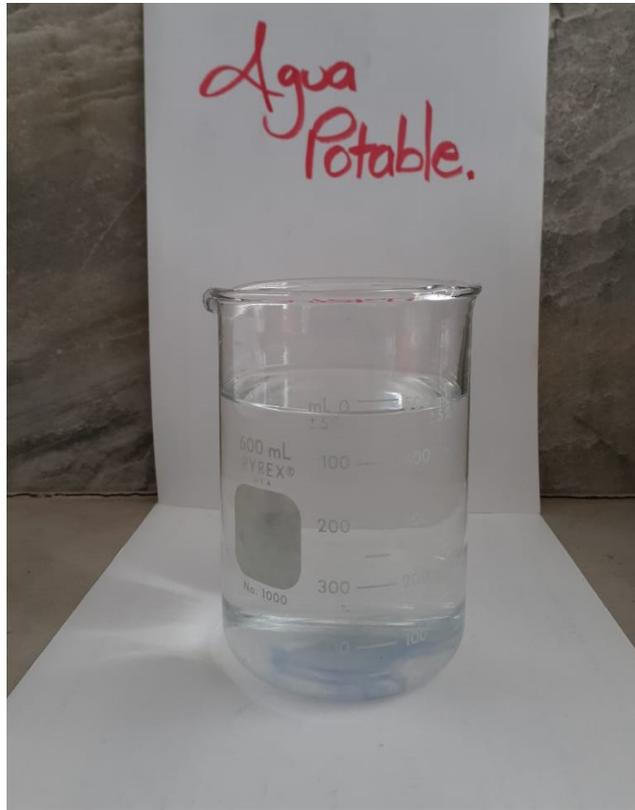


Figura 18 Muestra de agua potable.

Fuente: Autor.

Para la muestra 1 que se aprecia en la Figura 18 los contenidos de cloruros, sulfatos y álcalis obtenidos se exponen en la Tabla 15:

Tabla 15 Contenidos de impurezas inorgánicas obtenidos para la muestra de agua potable.

Impureza inorgánica	Contenido	Valores límites permisibles NTC 3459	Verificación
Cloruros	<19,9 mg Cl ⁻ / L	500 mg Cl ⁻ / L	Cumple
Sulfatos	15,0 mg SO ₄ ⁻² / L	3.000 mg SO ₄ ⁻² / L	Cumple
Carbonatos de álcalis	<25,5 mg CaCO ₃ /L	Total combinado	Cumple
Bicarbonatos de álcalis	<25,5 mg CaCO ₃ /L	1.000 mg CaCO ₃ /L	

Fuente: Autor.

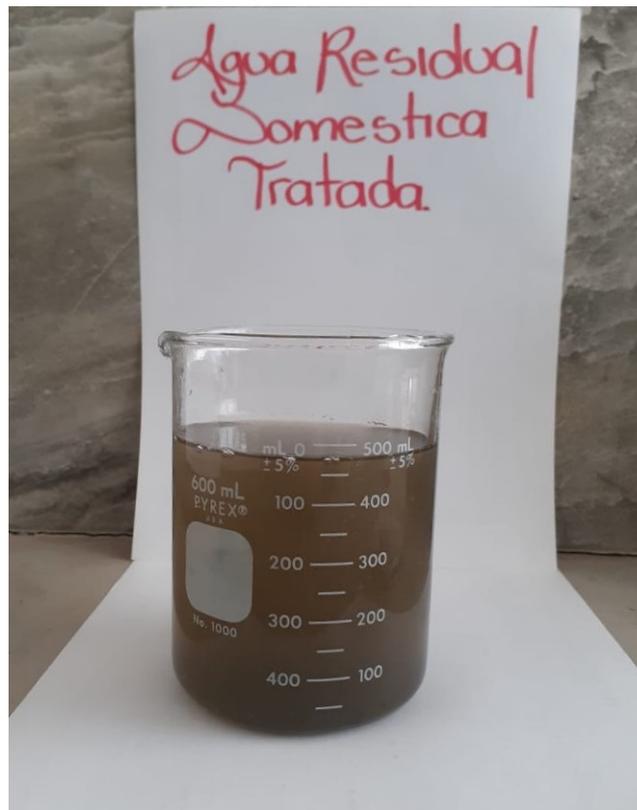


Figura 19 Muestra 2 agua residual doméstica tratada.

Fuente: Autor.

Para la muestra 2 que se aprecia en la Figura 19 los contenidos de cloruros, sulfatos y álcalis obtenidos se exponen en la Tabla 16:

Tabla 16 Contenidos de impurezas inorgánicas obtenidos para la muestra de agua residual doméstica tratada.

Impureza inorgánica	Contenido	Valores límites permisibles NTC 3459	Verificación
Cloruros	87,8 mg Cl ⁻ / L	500 mg Cl ⁻ / L	Cumple
Sulfatos	33,7 mg SO ₄ ⁻² / L	3.000 mg SO ₄ ⁻² / L	Cumple
Carbonatos de álcalis	<25,5 mg CaCO ₃ /L	Total combinado	Cumple
Bicarbonatos de álcalis	498 mg CaCO ₃ /L	1.000 mg CaCO ₃ /L	

Fuente: Autor.

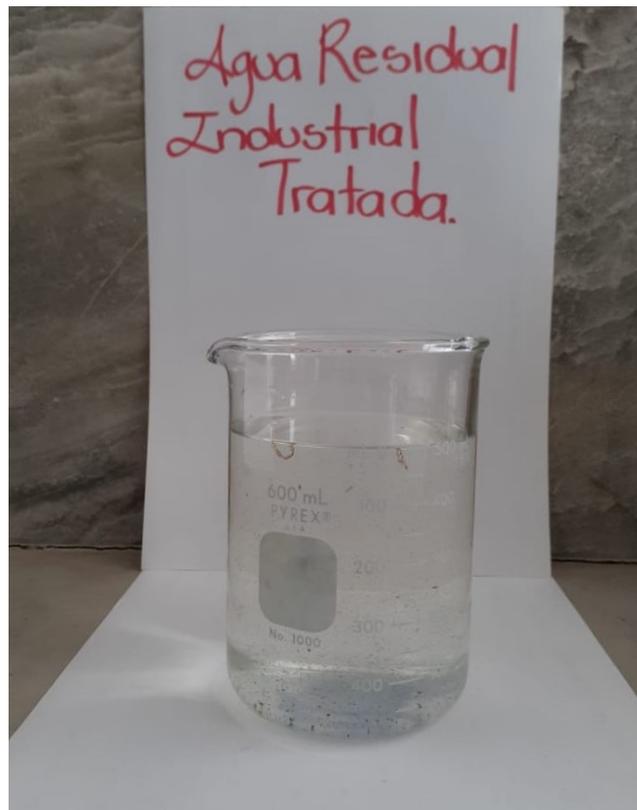


Figura 20 Muestra 3 agua residual industrial tratada.

Fuente: Autor.

Para la muestra 3 que se aprecia en la Figura 20 los contenidos de cloruros, sulfatos y álcalis obtenidos se exponen en la Tabla 17:

Tabla 17 Contenidos de impurezas inorgánicas obtenidos para la muestra de agua residual industrial tratada.

Impureza inorgánica	Contenido	Valores límites permisibles NTC 3459	Verificación
Cloruros	<19,9 mg Cl ⁻ / L	500 mg Cl ⁻ / L	Cumple
Sulfatos	12,9 mg SO ₄ ⁻² / L	3.000 mg SO ₄ ⁻² / L	Cumple
Carbonatos de álcalis	<25,5 mg CaCO ₃ /L	Total combinado	Cumple
Bicarbonatos de álcalis	99,6 mg CaCO ₃ /L	1.000 mg CaCO ₃ /L	

Fuente: Autor.

Al comparar los contenidos obtenidos de impurezas inorgánicas con los valores límites permisibles de contenidos que establece la norma NTC 3459 (ICONTEC, 2001), es posible inferir que son aceptables dado que no exceden los límites permisibles, lo que indica que las tres muestras de agua son apropiadas para la elaboración de concreto.

6.2. Fase II: Caracterizar el agregado grueso y fino para determinar sus propiedades físicas.

De la caracterización del agregado grueso y fino y del cemento, en la que se analizan la granulometría, las masas unitarias, las densidades relativas, la absorción y la humedad, y la densidad respectivamente se tiene que:

6.2.1. Determinación de la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados gruesos y finos mediante un proceso de tamizado por el método descrito en la norma NTC 77 (ICONTEC, 2018).

La gradación del agregado grueso se obtiene a partir de la determinación en el laboratorio de los pesos que se exponen en la Tabla 18:

Tabla 18 Pesos muestra de agregado grueso para la determinación de la granulometría.

Clasificación	Cantidad
Peso de la muestra (P ₁)	3.001 g
Peso de la muestra seca (P ₂)	2.893 g
Peso de la muestra lavada y seca (P ₃)	2.856 g
Pesos retenidos por cada tamiz (P ₄)	(Ver Tabla 19)

Fuente: Autor.

y mediante las siguientes expresiones:

- Tamaño máximo y tamaño máximo nominal es de 1" y de ¾" respectivamente.
- Humedad natural:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{3.001 \text{ g} - 2.893 \text{ g}}{2.893 \text{ g}} \times 100 = 3,73 \%$$

- Porcentaje (%) retenido por cada tamiz:

$$\% \text{ retenido} = \frac{P_{4-2} \times 100}{P_2} = \frac{686 \text{ g} \times 100}{2.893 \text{ g}} = 23,71 \%$$

- Porcentaje (%) retenido acumulado por cada tamiz:

$$\% \text{ retenido acumulado} = P_{4-1} + P_{4-2} = 0\% + 23,71\% = 23,71 \%$$

- Porcentaje (%) pasa por cada tamiz:

$$\% \text{ pasa} = 100 - \% \text{ retenido acumulado} = 100 - 23,71 \% = 76,29 \%$$

Tabla 19 Granulometría obtenida para el agregado grueso.

Tamiz (pulg)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
1"	0	0	0	100,00
¾"	686,0	23,71	23,71	76,29
½"	1872,0	64,71	88,42	11,58
⅜"	235,0	8,12	96,54	3,46
No. 4	46,0	1,59	98,13	1,87
No. 8	13,0	0,45	98,58	1,42
No. 200	4,0	0,14	98,72	1,28

Tamiz (pulg)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
Fondo	37,0	1,28	100,00	0
Total	2893,0	100,00	-	

Fuente: Autor.

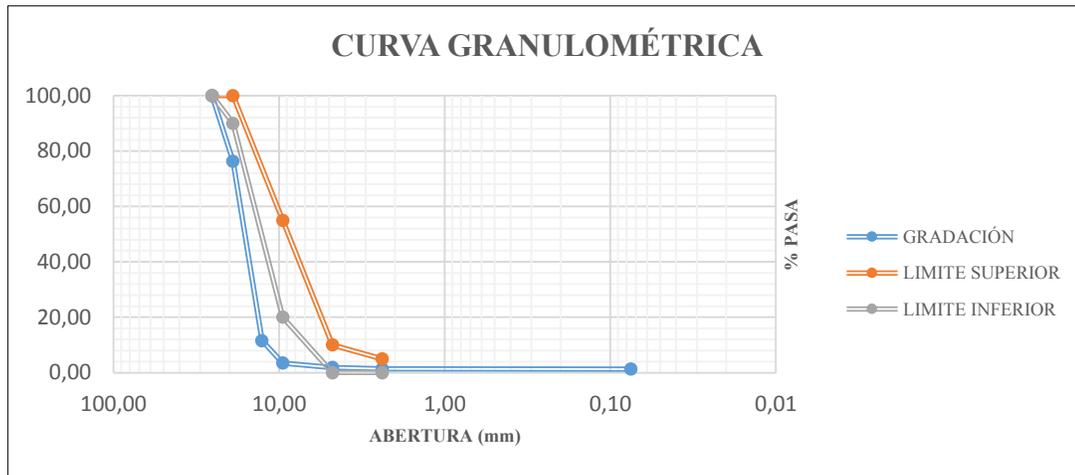


Figura 21 Curva granulométrica para el agregado grueso.

Fuente: Autor.

La gradación del agregado fino se obtiene a partir de la determinación en el laboratorio de los pesos que se exponen en la Tabla 21:

Tabla 20 Pesos muestra de agregado fino para la determinación de la granulometría.

Clasificación	Cantidad
Peso de la muestra (P ₁)	1.500 g
Peso de la muestra seca (P ₂)	1.482 g
Peso de la muestra lavada y seca (P ₃)	1.458 g
Pesos retenidos por cada tamiz (P ₄)	(Ver Tabla 21)

Fuente: Autor.

y mediante las siguientes expresiones:

- Humedad natural del agregado fino:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{1.500 \text{ g} - 1.482 \text{ g}}{1.482 \text{ g}} \times 100 = 1,21 \%$$

- Módulo de finura (MF) del agregado fino:

$$MF = \Sigma \% \text{ retenidos acumulados (1/2" - N° 100)}$$

$$MF = \frac{\Sigma(0 + 1,21 + 8,84 + 25,37 + 32,93 + 49,19 + 84,62 + 95,95)}{100} = 2,98$$

- Porcentaje (%) retenido por cada tamiz:

$$\% \text{ retenido} = \frac{P_{4-2} \times 100}{P_2} = \frac{18 \text{ g} \times 100}{1.482 \text{ g}} = 1,21 \%$$

- Porcentaje (%) retenido acumulado por cada tamiz:

$$\% \text{ retenido acumulado} = P_{4-1} + P_{4-2} = 0\% + 1,21\% = 1,21 \%$$

- Porcentaje (%) pasa por cada tamiz:

$$\% \text{ pasa} = 100 - \% \text{ retenido acumulado} = 100 - 1,21 \% = 98,76 \%$$

Tabla 21 Granulometría obtenida para el agregado fino.

Tamiz (pulg)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
1/2"	0	0	0	100,00
3/8"	18	1,21	1,21	98,79
No. 4	113,0	7,62	8,84	91,16
No. 8	245,0	16,53	25,37	74,63
No. 16	112,0	7,56	32,93	67,07
No. 30	241,0	16,26	49,19	50,81
No. 50	525,0	35,43	84,62	15,38
No. 100	168,0	11,34	95,95	4,05
No. 200	35,0	2,36	98,31	1,69
Fondo	25,0	1,69	100,00	0
Total	1482,0	100,00	-	-

Fuente: Autor.

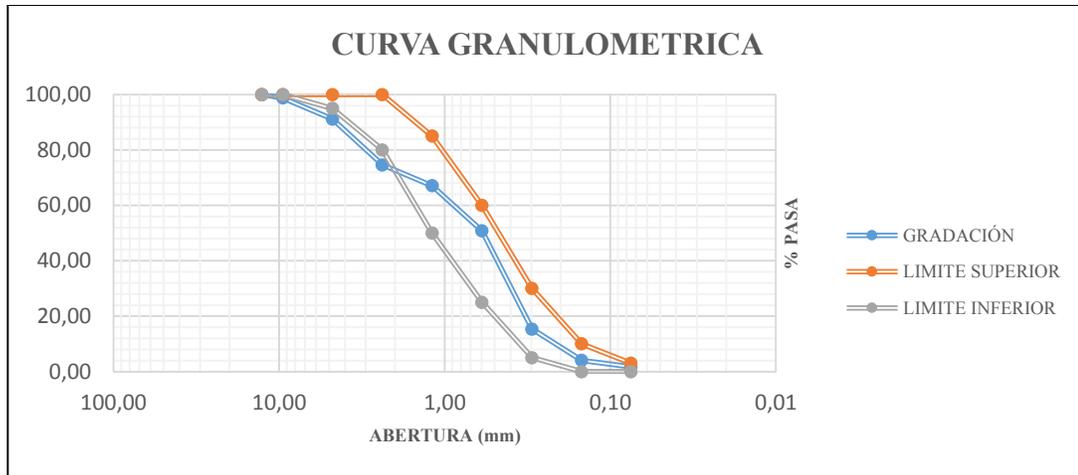


Figura 22 Curva granulométrica para el agregado fino.

Fuente: Autor.

A partir de las gradaciones obtenidas para el agregado grueso y fino, las cuales se evidencian en la Figura 21 y la Figura 22 respectivamente, es posible inferir que no cumplen con las recomendaciones granulométricas que establece la NTC 174 (ICONTEC, 2018).

6.2.2. Determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en los agregados finos y gruesos por el método descrito en la norma NTC 92 (ICONTEC, 2019).

Las masas unitarias suelta (MUS) y compacta (MUC) del agregado grueso y fino se obtienen a partir de la determinación en el laboratorio del volumen y los pesos que se exponen en la Tabla 22:

Tabla 22 Volumen y pesos del molde y la muestra de los agregados gruesos y finos para la determinación de la MUS y MUC.

Clasificación	Cantidad
Masa del molde (M)	1533,0 g.
Volumen del molde (V)	2891,0 cm ³ .
Masa del agregado (M _a)	(M _{m+a} – M)
Masa del molde más el agregado (M _{m+a})	(Ver Tabla 23 y Tabla 24)

Fuente: Autor.

y mediante la siguiente expresión:

$$MUS = \frac{M_a}{V} = \frac{(5.739 \text{ g} - 1.533 \text{ g})}{2.891 \text{ cm}^3} = 1,411 \text{ g/cm}^3$$

$$MUC = \frac{M_a}{V} = \frac{(5.910 \text{ g} - 4.377 \text{ g})}{2.891 \text{ cm}^3} = 1,468 \text{ g/cm}^3$$

Tabla 23 Masas unitarias suelta y compacta para el agregado grueso.

Ensayo No.	1	2	3	Promedio
Masa unitaria suelta (MUS)				
Masa del agregado + molde (M_{m+a}) (g)	5.739,0	5.734,0	5.735,0	5.736,0
Masa del agregado (M_a) (g)	4.206,0	4.201,0	4.202,0	4.203,0
Masa unitaria suelta (MUS) (g/cm^3)	1,411	1,409	1,410	1,410
Masa unitaria compacta (MUC)				
Masa del agregado + molde (M_{m+a}) (g)	5910,0	5902,0	5910,0	5907,0
Masa del agregado (M_a) (g)	4377,0	4369,0	4377,0	4374,0
Masa unitaria suelta (MUS) (g/cm^3)	1,468	1,466	1,468	1,467

Fuente: Autor.

Tabla 24 Masas unitarias suelta y compacta para agregado fino.

Ensayo No.	1	2	3	Promedio
Masa unitaria suelta (MUS)				
Masa del agregado + molde (M_{m+a}) (g)	6489,0	6486,0	6482,0	6486,0
Masa del agregado (M_a) (g)	4956,0	4953,0	4949,0	4953,0
Masa unitaria suelta (MUS) (g/cm^3)	1,663	1,662	1,660	1,661
Masa unitaria compacta (MUC)				
Masa del agregado + molde (M_{m+a}) (g)	6710,0	6754,0	6755,0	6740,0
Masa del agregado (M_a) (g)	5177,0	5221,0	5222,0	5207,0
Masa unitaria suelta (MUS) (g/cm^3)	1,737	1,751	1,752	1,767

Fuente: Autor.

6.2.3. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso por el método descrito en la norma NTC 176 (ICONTEC, 2019).

Las densidades relativas y absorción del agregado grueso se obtienen a partir de la determinación en el laboratorio de los pesos que se exponen en la Tabla 25:

Tabla 25 Pesos muestra de agregado grueso para la determinación de las densidades relativas y la absorción.

Clasificación	Cantidad
Peso en aire de la muestra seca (A)	4.800,0 g.
Peso en aire de la muestra saturada y superficialmente seca (B)	5.001,0 g.
Peso de la muestra saturada (C)	2.902,0 g.

Fuente: Autor.

y mediante las siguientes expresiones:

- Densidad relativa (SH):

$$SH = \frac{A}{(B - C)} = \frac{4.800 \text{ g}}{(5.001 \text{ g} - 2.902 \text{ g})} = 2,29 \text{ g/cm}^3$$

- Densidad relativa (SSS):

$$SSS = \frac{B}{(B - C)} = \frac{5.001 \text{ g}}{(5.001 \text{ g} - 2.902 \text{ g})} = 2,38 \text{ g/cm}^3$$

- Densidad relativa aparente:

$$Aparente = \frac{A}{(A - C)} = \frac{4.800 \text{ g}}{(4.800 \text{ g} - 2.902 \text{ g})} = 2,53 \text{ g/cm}^3$$

- Absorción:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(B - A)}{A} \times 100 = \frac{5.001 \text{ g} - 4.800 \text{ g}}{4.800 \text{ g}} = 4,19\%$$

6.2.4. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino por el método descrito en la norma NTC 237 (ICONTEC, 2020).

Las densidades relativas y absorción del agregado fino se obtienen a partir de la determinación en el laboratorio de los volúmenes y pesos que se exponen en la Tabla 26:

Tabla 26 Volúmenes y pesos muestra de agregado fino para la determinación de las densidades relativas y la absorción.

Clasificación	Cantidad
Peso de la muestra en el estado seca (A)	491 g
Peso del picnómetro (V)	500 g
Peso del picnómetro más agua (V ₁)	650 g
Peso del picnómetro más agua y más agregado (V ₂)	959 g
Peso de la muestra introducida en el picnómetro (W)	308 g

Fuente: Autor.

y mediante las siguientes expresiones:

- Densidad relativa (SH):

$$SH = \frac{A}{(V - W)} = \frac{491 \text{ g}}{(500 \text{ cm}^3 - 308 \text{ cm}^3)} = 2,56 \text{ g/cm}^3$$

- Densidad relativa (SSS):

$$SSS = \frac{500}{(V - W)} = \frac{500}{(500 \text{ cm}^3 - 308 \text{ cm}^3)} = 2,60 \text{ g/cm}^3$$

- Densidad relativa aparente:

$$Aparente = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)} = \frac{491 \text{ g}}{(500 \text{ cm}^3 - 308 \text{ cm}^3) - (500 - 491 \text{ cm}^3)} = 2,69 \text{ g/cm}^3$$

- Absorción:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(500 - A)}{A} \times 100 = \frac{(500 - 491)}{491} \times 100 = 1,83 \%$$

6.2.5. Determinación de la densidad del cemento hidráulico por el método descrito en la norma NTC 221 (ICONTEC, 2019).

La densidad del cemento hidráulico se obtiene a partir de la determinación en el laboratorio de los volúmenes y pesos que se exponen en la Tabla 27:

Tabla 27 Volúmenes y pesos muestra de cemento hidráulico para la determinación de la densidad.

Clasificación	Cantidad
Masa de cemento (Mc)	64,0 g
Volumen inicial (Vi) de queroseno	0,80 cm ³
Volumen final (Vf) de queroseno	22,50 cm ³

Fuente: Autor.

y mediante la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{M_c}{(V_f - V_i)} = \frac{64 \text{ g}}{(22,50 \text{ cm}^3 - 0,80 \text{ cm}^3)} = 2,95 \text{ g/cm}^3$$

6.3. Fase III: Elaborar el diseño de la mezcla de concreto ($f'_c = 28 \text{ MPa}$).

Considerando que el concreto a dosificar se requiere para la construcción de columnas y vigas, se tiene que la condición de colocación es con vibración, la condición de exposición es baja ya que no estarán expuestas a ciclos de congelamiento y deshielo ni a ambientes severos, la consistencia media, el grado de trabajabilidad es medio y la resistencia a la compresión a los 28 días es de 28 MPa, la elaboración del diseño de mezcla de concreto se realiza para determinar las cantidades de materiales requeridas por peso y por volumen respecto a 1 metro cubico (m³) de concreto y se obtiene a partir de la determinación y el cálculo de:

- Elección del asentamiento:

Teniendo en cuenta que el tipo de estructura y la condición de colocación es columnas y vigas con vibración, y que para el elemento estructural la consistencia es media y el grado de trabajabilidad es medio, con base en la Tabla 8 se estima un asentamiento de 5,0 a 10,0 cm, pero se adopta específicamente para este caso un asentamiento de 10,0 cm.

- Elección del tamaño máximo nominal:

Con base en la granulometría obtenida se tiene que el tamaño máximo nominal es de 1" (24,5 mm).

- Estimación del contenido de aire:

Considerando que el elemento estructural no estará expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo ni a ambientes severos, no se requiere el uso de incorporados de aire, sin embargo con base en la Tabla 9 se estima que para un tamaño máximo nominal de 1" (24,5 mm) el porcentaje promedio aproximado de aire atrapado es del 0%, es decir:

$$V_a = 0 \text{ m}^3$$

- Estimación del contenido (a) y el volumen de agua de mezclado (V_w):

En vista de que el tamaño máximo nominal del agregado grueso es de 1" (25,4 mm), que el asentamiento previsto será de 10,0 cm y que el contenido aproximado de aire atrapado en concreto sin aire incluido es de 0%, con base en la Tabla 10 se tiene que el contenido de agua de mezclado es de:

$$a = 195,0 \text{ kg/m}^3$$

Y por consiguiente el volumen de agua de mezclado (V_w) es de

$$V_w = \frac{195,0 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,195 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

- Elección de la relación agua/cemento (a/c):

Inicialmente se determina la resistencia de diseño $f'_{cr} = f'_c + 8,3$

$$f'_{cr} = 28 \text{ MPa} + 8,3 = 36,3 \text{ MPa} \quad \text{ó} \quad 363,0 \text{ kg/cm}^2$$

Y posteriormente con base en la Tabla 11 para un concreto sin aire incluido y para una resistencia de diseño de $f'_{cr} = 350,0 \text{ kg/cm}^2$, ya que es el valor de resistencia máximo, se tiene que la relación agua/cemento es de:

$$r = 0,40$$

- Cálculo del contenido (C) y el volumen de cemento (V_c):

Teniendo en cuenta la relación agua/cemento se tiene que el contenido y el volumen de cemento son respectivamente de:

$$c = \frac{195 \text{ kg/m}^3}{0,40} = 487,5 \text{ kg/m}^3$$

$$V_c = \frac{487,5 \text{ kg/m}^3}{2950 \text{ kg/m}^3} = 0,165 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

- Verificación de las especificaciones granulométricas de los agregados grueso y fino:

Con base en la Tabla 28 y en la Tabla 29 a partir de la verificación de las especificaciones granulométricas para los agregados grueso y fino respectivamente, es posible inferir que no cumplen con las recomendaciones granulométricas, por lo que se debe optimizar las granulometrías.

Tabla 28 Verificación de las especificaciones granulométricas del agregado grueso.

Tamiz (pulg)	% Pasa			Verificación
	Límite superior	Gradación	Límite inferior	
1"	100	100,00	100	Cumple
3/4"	100	76,29	90	No cumple
1/2"		11,58		-
3/8"	55	3,46	20	No cumple
No. 4	10	1,87	0	Cumple
No. 8	5	1,42	0	Cumple

Fuente: Autor.

Tabla 29 Verificación de las especificaciones granulométricas del agregado fino.

Tamiz (pulg)	% Pasa			Verificación
	Límite superior	Gradación	Límite inferior	
3/8"	100	98,79	100	No cumple
No. 4	100	91,16	95	No cumple

Tamiz (pulg)	% Pasa			Verificación
	Límite superior	Gradación	Límite inferior	
No. 8	100	74,63	80	No cumple
No. 16	85	67,07	50	Cumple
No. 30	60	50,81	25	Cumple
No. 50	30	15,38	5	Cumple
No. 100	10	4,05	0	Cumple

Fuente: Autor.

- Optimización de las granulometrías de los agregados grueso y fino:

Como se evidencia en la Figura 23 a partir de la optimización de las granulometrías para los agregados grueso y fino, es posible inferir que la combinación óptima se tiene proporcionando 45% y 55% de agregado grueso y fino respectivamente.

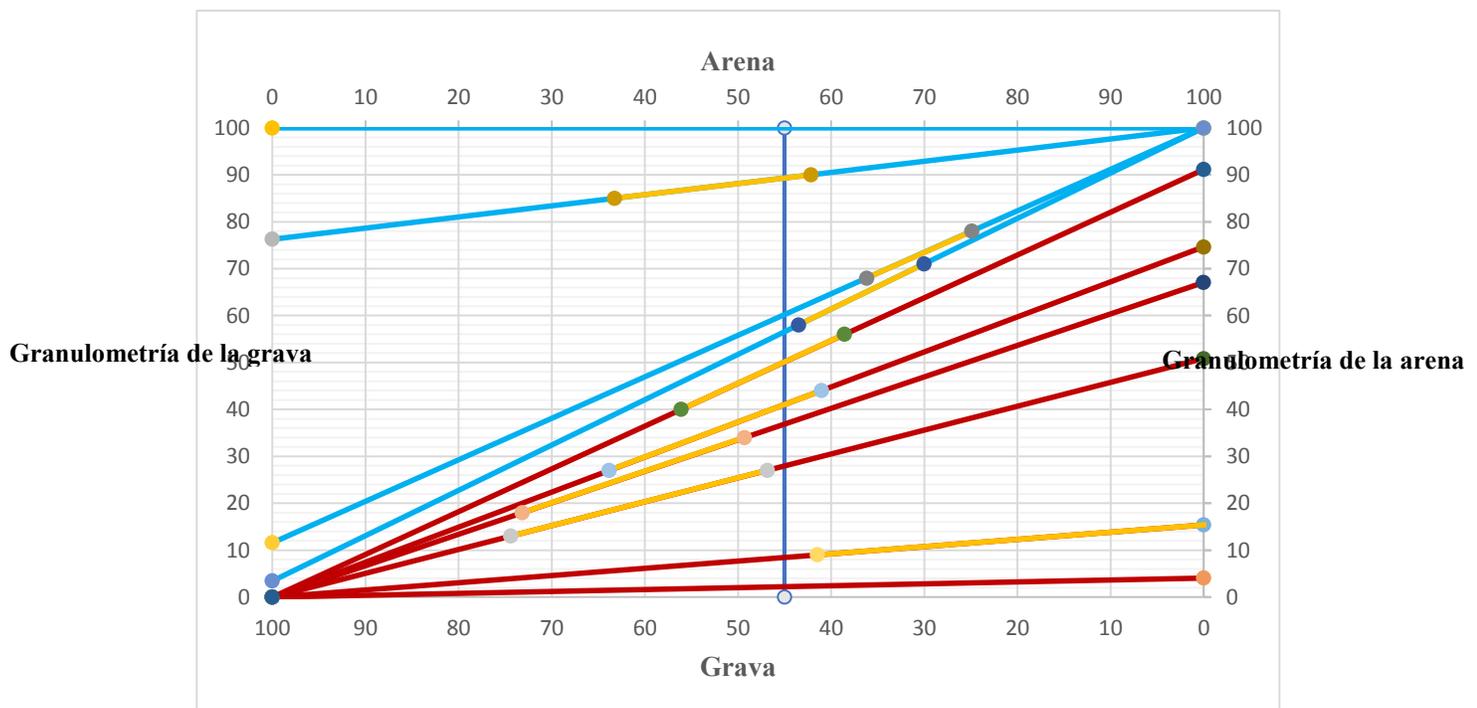


Figura 23 Optimización de la granulometría de los agregados grueso y fino.

Fuente: Autor.

A partir de la optimización de las granulometrías obtenidas y teniendo en cuenta la especificación granulométrica elegida se tiene que los porcentajes que pasan correspondientes a cada tamiz del material combinado se exponen en la Tabla 30:

Tabla 30 Porcentajes que pasan correspondientes a cada tamiz del material combinado.

Tamiz (pulg)	% Pasa		
	Grava	Arena	Material combinado
1"	100,00		100,00
3/4"	76,29		89,00
1/2"	11,58	100,00	60,00
3/8"	3,46	98,79	56,00
No. 4	1,87	91,16	50,00
No. 8	1,42	74,63	41,00
No. 16		67,07	37,00
No. 30		50,81	28,00
No. 50		15,38	8,00
No. 100		4,05	2,00

Fuente: Autor.

- Cálculo del contenido de los agregados grueso (W_g) y fino (W_f) y el volumen de los agregados grueso y fino (V_g):

Considerando el volumen de aire (V_a), de agua (V_w) y de cemento (V_c) se tiene que el volumen de los agregados grueso y fino (V_g) es de:

$$V_g = 1 - (0 \text{ m}^3 + 487,5 \text{ m}^3/\text{m}^3 + 0,195 \text{ m}^3/\text{m}^3)$$

$$V_g = 0,64 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Posteriormente a partir de la densidad aparente y los porcentajes obtenidas de la combinación óptima de los agregados grueso y fino se tiene que la densidad aparente promedio para estos es de:

$$D_{prom} = ((55\% \times 2.690 \text{ kg/m}^3) + ((45\% \times 2.290 \text{ kg/m}^3))$$

$$D_{prom} = 2.510 \text{ kg/m}^3$$

Seguido de esto con base en la densidad aparente promedio, los porcentajes obtenidos de la combinación óptima y el volumen de los agregados grueso y fino se tiene que el contenido de cada uno es respectivamente de:

$$W_g = (2.510 \text{ kg/m}^3 \times 0,64 \text{ m}^3/\text{m}^3 \times 45 \%)$$

$$W_g = 723,0 \text{ kg/m}^3$$

$$W_f = (2.510 \text{ kg/m}^3 \times 0,64 \text{ m}^3/\text{m}^3 \times 55 \%)$$

$$W_f = 884,0 \text{ kg/m}^3$$

- Ajuste por humedad de la cantidad o volumen de agua de mezclado (V_w) :

Con base en la humedad y la absorción de los agregados grueso y fino se tiene que el contenido de agua en exceso o libre es respectivamente de:

$$A_g = (723,0 \text{ kg/m}^3 \times (3,73 \% + 4,19 \%)$$

$$A_g = 57,27 \text{ kg/m}^3$$

$$A_f = (884,0 \text{ kg/m}^3 \times (1,21 \% + 1,83 \%)$$

$$A_f = 26,94 \text{ kg/m}^3$$

Posteriormente teniendo en cuenta que la dosificación se realiza considerando los agregados grueso y fino en estado seco se tiene que el contenido total de agua de mezclado corresponde a la diferencia entre el contenido de agua de mezclado y el contenido de agua en exceso o libre de los agregados grueso y fino y es de:

$$A = 195,0 \text{ kg/m}^3 - (57,27 \text{ kg/m}^3 + 26,94 \text{ kg/m}^3)$$

$$A = 111,0 \text{ kg/m}^3$$

- Corrección de los contenidos y volúmenes de agua, de cemento y de los agregados grueso y fino:

Con base en el ajuste por humedad del contenido total del agua de mezclado se tiene que:

El contenido (a) y el volumen de agua de mezclado (V_w) corregido son respectivamente

de:

$$a = 111,0 \text{ kg/m}^3 \quad \text{ó} \quad V_w = \frac{a}{\gamma_w} = \frac{111,0 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,111 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

El contenido (C) y el volumen de cemento (V_c) corregido son respectivamente de:

$$C = \frac{a}{a/c} = \frac{111 \text{ kg/m}^3}{0,40} = 277,5 \text{ kg/m}^3$$

$$V_c = \frac{c}{\gamma_c} = \frac{277,5 \text{ kg/m}^3}{2.950 \text{ kg/m}^3} = 0,094 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

El volumen de los agregados grueso y fino (V_g) corregido es de:

$$V_g = 1 - (0 \text{ m}^3 + 0,111 \text{ m}^3/\text{m}^3 + 0,094 \text{ m}^3/\text{m}^3)$$

$$V_g = 0,79 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

El contenido de los agregados grueso (W_g) y fino (W_f) corregidos son respectivamente

de:

$$W_g = (2.510 \text{ kg/m}^3 \times 0,79 \text{ m}^3/\text{m}^3 \times 45 \%)$$

$$W_g = 898,0 \text{ kg/m}^3$$

$$W_f = (2.510 \text{ kg/m}^3 \times 0,79 \text{ m}^3/\text{m}^3 \times 55 \%)$$

$$W_f = 1098,0 \text{ kg/m}^3$$

A partir del procedimiento de dosificación se tiene que las proporciones requeridas de aire, de agua, de cemento y de agregados grueso y fino para 1 m³ de concreto son las que se exponen en la Tabla 31:

Tabla 31 Proporciones de los materiales requeridas para 1 m³ de concreto.

Material	Peso (W kg/m ³)	Densidad (γ kg/m ³)	Volumen (V m ³ /m ³)
Cemento	277,5	2950,00	0,094
Agua	111,0	1000	0,111
Aire	0	0	0,000
Grava	898,00	2290,00	0,392
Arena	1098,00	2690,00	0,408
Total	2384,5		1,00

Fuente: Autor.

- Determinación del volumen total requerido de concreto y las cantidades totales de materiales requeridos para la elaboración de los especímenes de concreto y la verificación del asentamiento de la mezcla.

Inicialmente a partir de las dimensiones previamente conocidas del Cono de Abrams y de los moldes cilíndricos de 6"x12" y de 4"x8" se debe determinar el volumen de cada uno, los cuales son respectivamente de:

$$V_{\text{Cono de Abrams}} = (\pi \times h/3) \times (R^2 + R \times r + r^2)$$

$$V_{\text{Cono de Abrams}} = 0,0058 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Molde cilindrico de 6" x12"}} = (\pi \times r^2 \times h)$$

$$V_{\text{Molde cilindrico de 6" x12"}} = 0,0053 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Molde cilindrico de 4" x8"}} = (\pi \times r^2 \times h)$$

$$V_{\text{Molde cilindrico de 4" x8"}} = 0,0016 \text{ m}^3$$

Posteriormente con base en los volúmenes calculados se determina el volumen total requerido de concreto, teniendo en cuenta que se empleará 1 Cono de Abrams y 8 moldes cilindros de 6"x12" y 2 moldes cilíndricos de 4"x8", el cual es de:

$$v_{Total} = (V_{Cono\ de\ Abrams} + V_{Molde\ cilindrico\ de\ 6" \times 12" \times 8\ und} + V_{Molde\ cilindrico\ de\ 4" \times 8" \times 2})$$

$$V_{Total} = 0,0513\ m^3$$

Seguido de esto con el volumen total requerido de concreto se determinan las cantidades totales de materiales requeridos, las cuales se exponen en la Tabla 32:

Tabla 32 Cantidades totales de los materiales requeridos para la mezcla.

Material	Peso (kg)
Cemento	14,24
Agua	4,71
Grava	38,09
Arena	46,57

Fuente: Autor.

Finalmente se determinan los pesos retenidos correspondientes a cada tamiz del material combinado, a partir de las cantidades totales requeridas de los agregados grueso y fino y teniendo en cuenta los porcentajes que pasan correspondientes a cada tamiz del material combinado, obtenidos de la optimización de las granulometrías, son los que se exponen en la Tabla 33:

Tabla 33 Pesos retenidos correspondientes a cada tamiz del material combinado.

Tamiz (pulg)	% Pasa	% Retenido Acumulado	% Retenido	Peso retenido (g)
1"	100,00	0,00	0,00	0
3/4"	89,00	11,00	11,00	9501,91
1/2"	60,00	40,00	29	25050,48
3/8"	56,00	44,00	4,00	3455,24
No. 4	50,00	50,00	6,00	5182,86
No. 8	41,00	59,00	9,00	7774,29
No. 16	37,00	63,00	4,00	3455,24

Tamiz (pulg)	% Pasa	% Retenido Acumulado	% Retenido	Peso retenido (g)
No. 30	28,00	72,00	9,00	7774,29
No. 50	8,00	92,00	20,00	17276,20
No. 100	2,00	98,00	6,00	5182,86
Total	-	-	98,00	84653,36

Fuente: Autor.

6.4. Fase IV: Elaborar y curar los especímenes cilíndricos de concreto simple.

De la elaboración de los especímenes de concreto simple elaborados a partir de diferentes mezclas, cuya composición varía de acuerdo con el tipo de agua empleada, es decir, a partir de las tres muestras de agua, agua potable y aguas residuales tratadas de tipo doméstico e industrial, las cuales se denominaron mezcla 1, mezcla 2 y mezcla 3 respectivamente, se tiene que:

Tabla 34 Asentamientos obtenidos para cada tipo de mezcla elaborada.

Tipo de mezcla	Asentamiento
Mezcla de diseño	10,00 cm
Mezcla 1	10,20 cm
Mezcla 2	10,30 cm
Mezcla 3	10,10 cm

Fuente: Autor.

Al comparar los asentamientos obtenidos para cada tipo de mezcla que se exponen en la Tabla 34 con el asentamiento elegido, es posible inferir que son equivalentes entre sí, lo que indica que se obtuvo tanto la consistencia y como el grado de fluidez que se definieron en el diseño de mezcla. Además el curado de los especímenes se llevó a cabo mediante inmersión en tanques con agua durante 28 días.

6.5. Fase V: Evaluar la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto simple.

De la evaluación de la resistencia a la compresión a la edad de 7, 14, 21 y 28 días de los especímenes cilíndricos de concreto simple elaborados a partir de diferentes mezclas, cuya composición varía de acuerdo con el tipo de agua empleada, es decir, a partir de las tres muestras de agua, agua potable y aguas residuales tratadas de tipo doméstico e industrial, las cuales se denominaron mezcla 1, mezcla 2 y mezcla 3 respectivamente, se tiene que:

Tabla 35 Resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto simple correspondientes a la mezcla 1.

Resistencia de diseño (MPa)	Edad (Días)	Diámetro (cm)	Área (m ²)	Carga espécimen No. 1 (kN)	Carga espécimen No. 2 (kN)	Promedio de carga (kN)	Resistencia obtenida (MPa)	% Evolución resistencia
28,0	7,0	15,05	0,0178	281,20	272,10	276,65	15,55	55,54
	14,0	15,10	0,0179	379,80	361,70	370,75	20,70	73,94
	21,0	15,08	0,0179	414,20	416,80	415,50	23,26	83,08
	28,0	15,20	0,0182	511,30	519,20	515,25	28,39	101,41
	56,0	15,15	0,0180	574,50	573,80	574,15	31,85	113,75

Fuente: Autor.

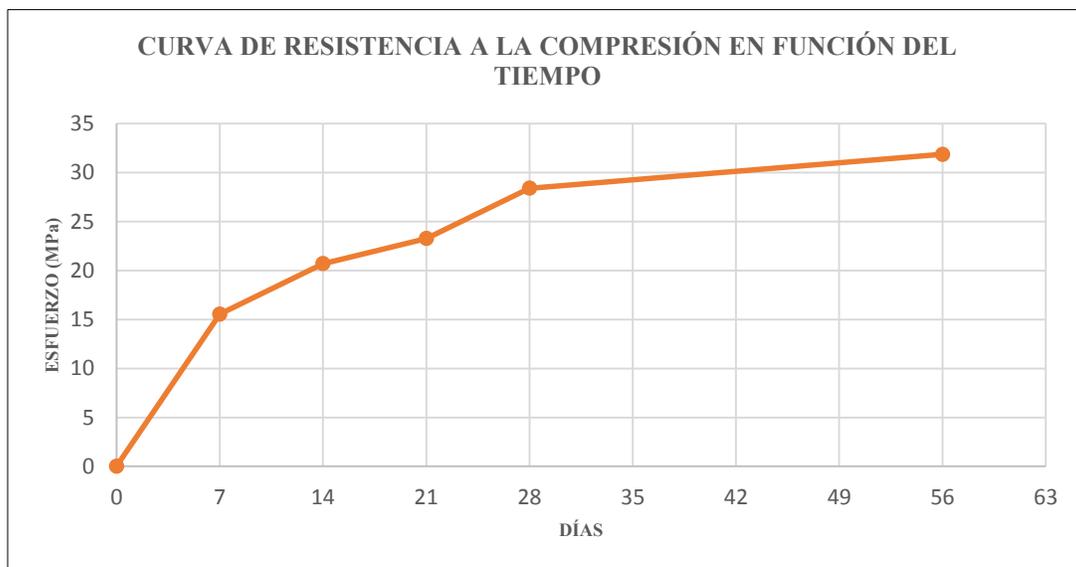


Figura 24 Curva de resistencia a la compresión en función del tiempo para la mezcla 1.

Fuente: Autor.

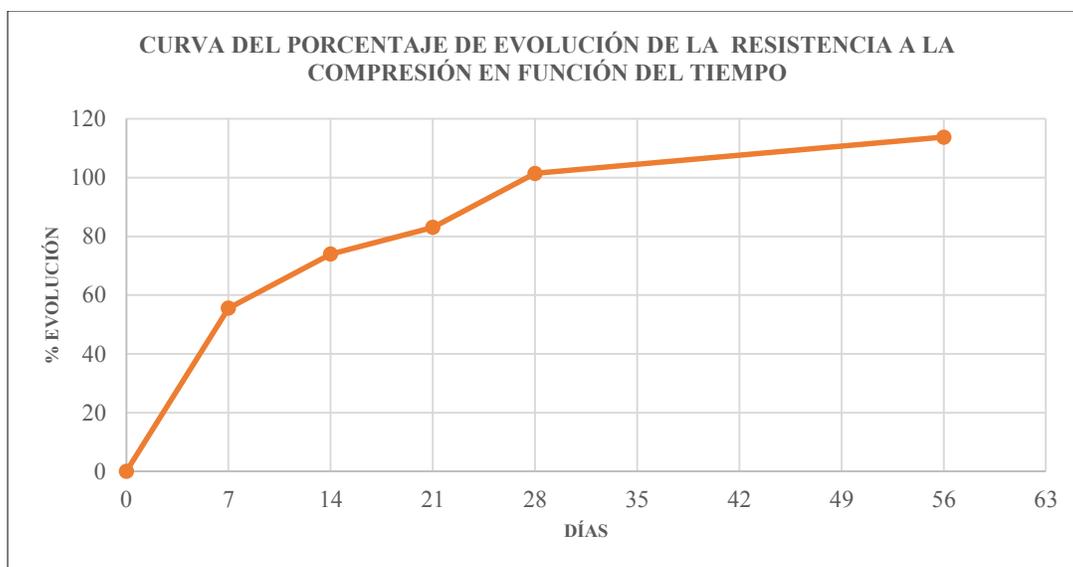


Figura 25 Curva del porcentaje de evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo para la mezcla 1.

Fuente: Autor.

Como se evidencia en la Tabla 35 y en la Figura 25 las resistencias a la compresión obtenidas para los especímenes elaborados a partir de la mezcla 1 con agua potable, aumentaron de manera progresiva desde la edad de 7 días hasta los 56 días, las cuales aunque para las edades de 7, 14 y 21 días no se dieron conforme al aumento promedio de la resistencia con el tiempo, es decir con porcentajes de evolución del 60%, 80%, 90% respectivamente, para la edades de 28 y 56 días si se logró obtener más del 100% y el 110% de la resistencia de diseño respectivamente.

Tabla 36 Resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto simple correspondientes a la mezcla 2.

Resistencia de diseño (MPa)	Edad (Días)	Diámetro (cm)	Área (m ²)	Carga espécimen No. 1 (kN)	Carga espécimen No. 2 (kN)	Promedio de carga (kN)	Resistencia obtenida (MPa)	% Evolución resistencia
28,0	7,0	15,10	0,01791	290,8	292,2	291,5	16,28	58,1
	14,0	15,08	0,01786	326,9	300,1	313,5	17,55	62,7
	21,0	15,14	0,01800	360,2	377,7	369,0	20,49	73,2
	28,0	15,06	0,01781	389,1	385,0	387,1	21,73	77,6
	56,0	15,20	0,01815	427,6	424,0	425,8	23,47	83,8

Fuente: Autor.

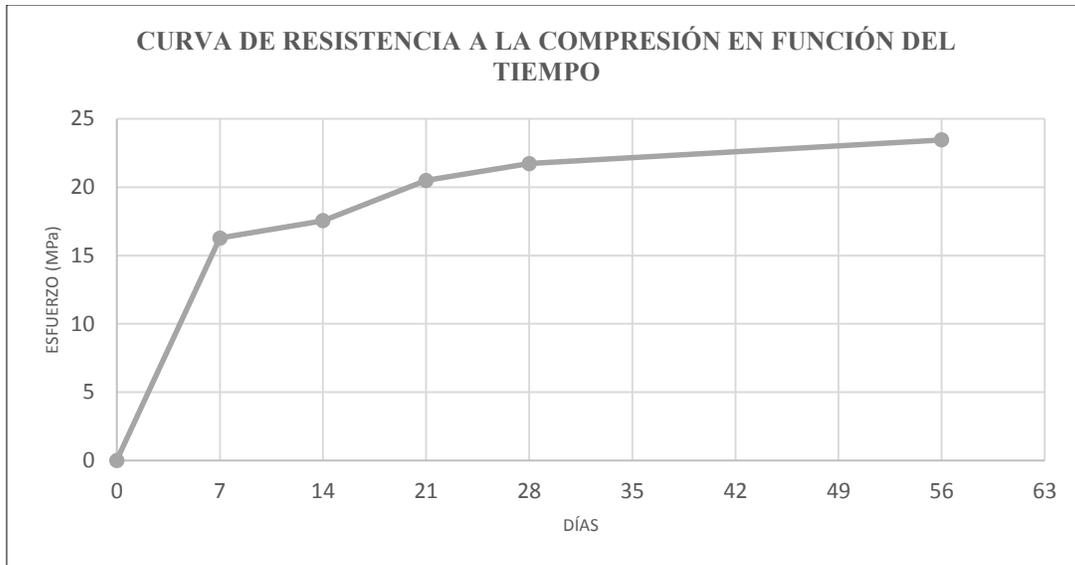


Figura 26 Curva de resistencia a la compresión en función del tiempo para la mezcla 2.

Fuente: Autor.

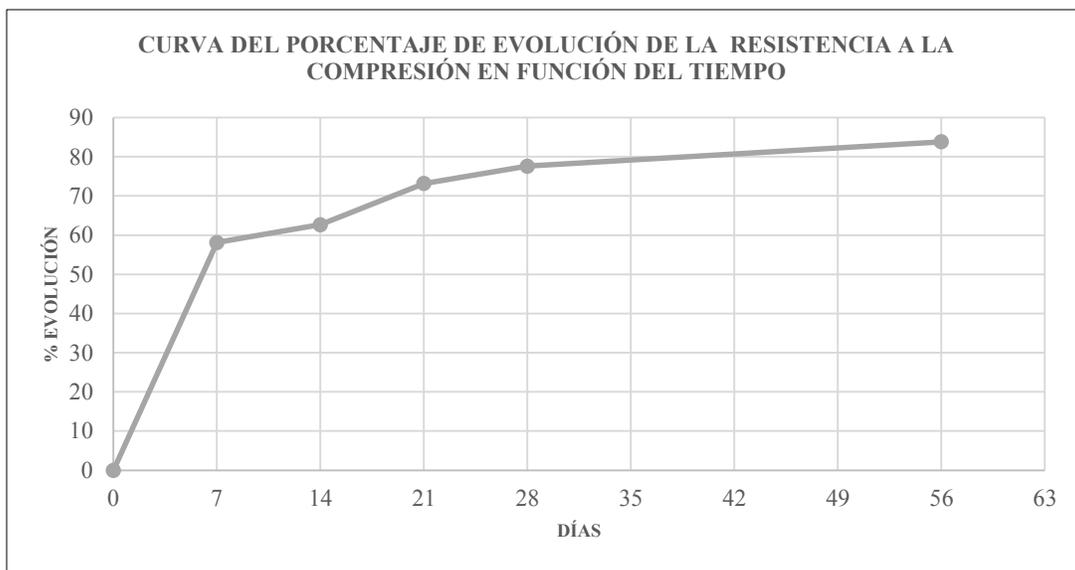


Figura 27 Curva del porcentaje de evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo para la mezcla 2.

Fuente: Autor.

Como se evidencia en la Tabla 36 y en la Figura 27 las resistencias a la compresión obtenidas para los especímenes elaborados a partir de la mezcla 2 con agua residual doméstica tratada, aumentaron de manera progresiva desde la edad de 7 días hasta los 56 días, pero para

cada una de las edades no se dieron conforme al aumento promedio de la resistencia con el tiempo, es decir con porcentajes de evolución del 60%, 80%, 90%, 100% y 110% respectivamente, es decir que para la edad de 28 días no se logró obtener el 100% de la resistencia de diseño.

Tabla 37 Resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto simple correspondientes a la mezcla 3.

Resistencia de diseño (MPa)	Edad (Días)	Diámetro (cm)	Área (m ²)	Carga espécimen No. 1 (kN)	Carga espécimen No. 2 (kN)	Promedio de carga (kN)	Resistencia obtenida (MPa)	% Evolución resistencia
28,0	7,0	15,18	0,0181	254,6	234,5	244,6	13,51	48,3
	14,0	15,15	0,0180	313,6	330,2	321,9	17,86	63,8
	21,0	15,20	0,0182	375,4	383,9	379,7	20,92	74,7
	28,0	15,08	0,0179	412,2	412,5	412,4	23,09	82,5
	56,0	15,10	0,0179	459,8	448,0	453,9	25,35	90,5

Fuente: Autor.

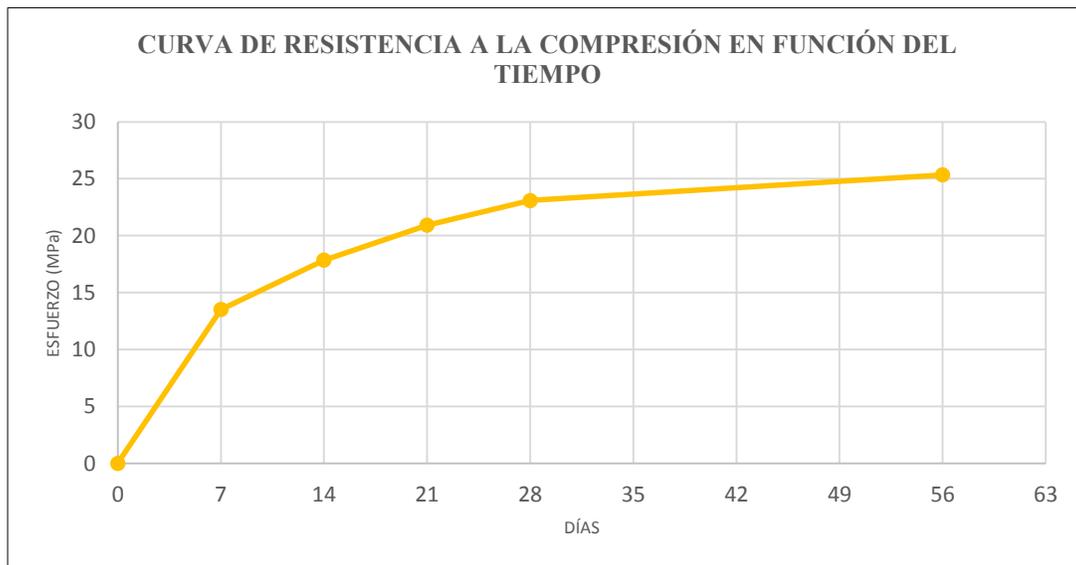


Figura 28 Curva de resistencia a la compresión en función del tiempo para la mezcla 3.

Fuente: Autor.

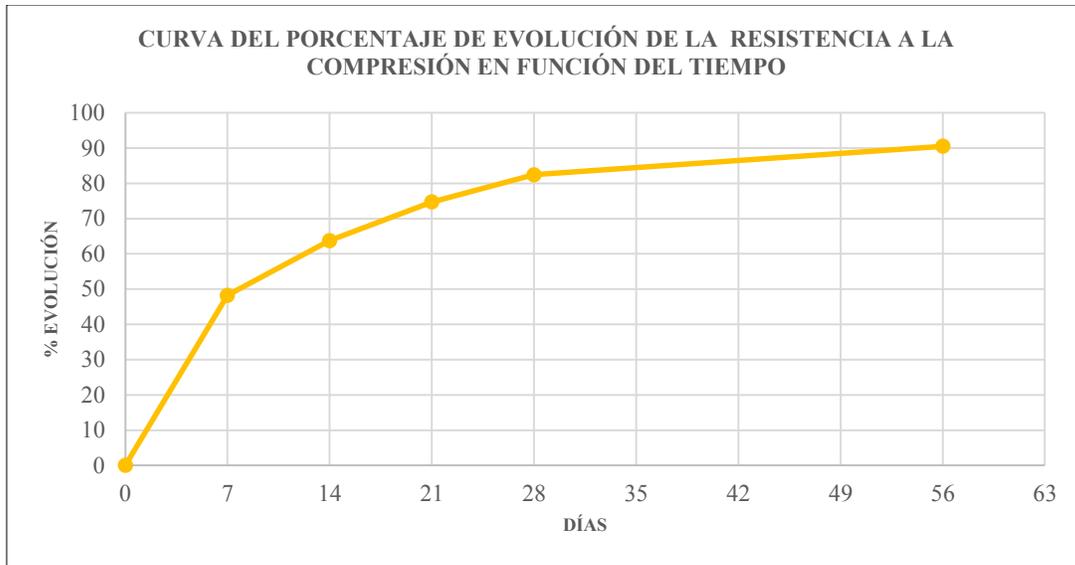


Figura 29 Curva del porcentaje de evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo para la mezcla 3.

Fuente: Autor.

Como se evidencia en la Tabla 37 y en la Figura 29 las resistencias a la compresión obtenidas para los especímenes elaborados a partir de la mezcla 3 con agua residual industrial tratada, aumentaron de manera progresiva desde la edad de 7 días hasta los 56 días, pero para cada una de las edades no se dieron conforme al aumento promedio de la resistencia con el tiempo, es decir con porcentajes de evolución del 60%, 80%, 90%, 100% y 110% respectivamente, es decir que para la edad de 28 días no se logró obtener el 100% de la resistencia de diseño.

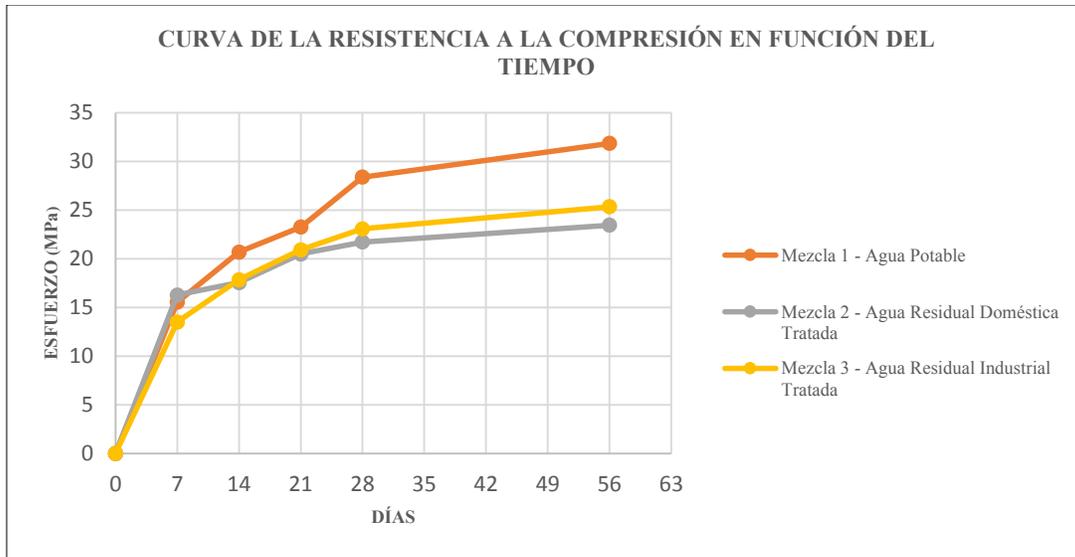


Figura 30 Curva del porcentaje de evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo para las 3 mezclas.

Fuente: Autor.

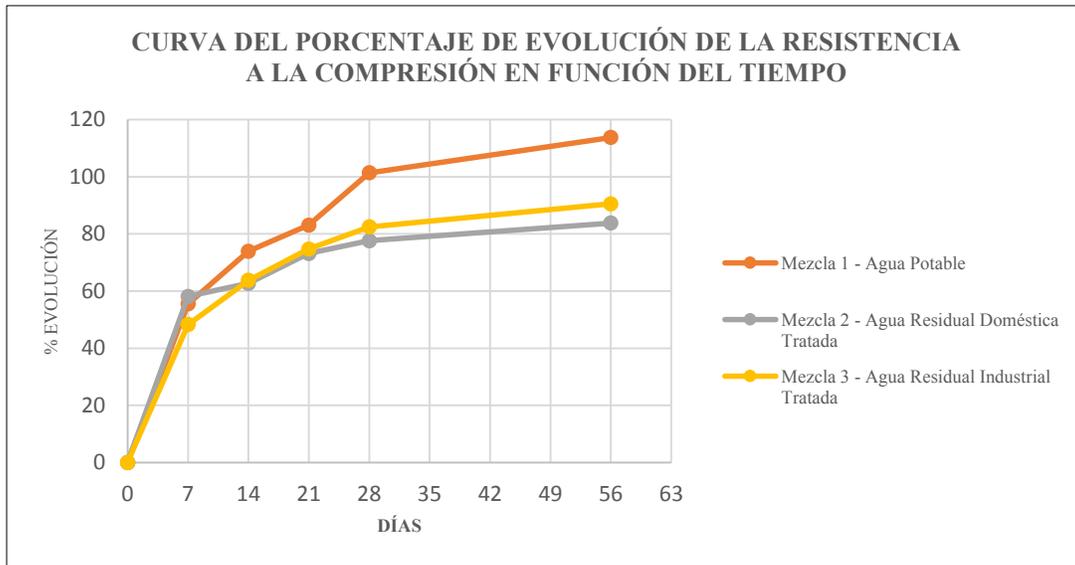


Figura 31 Curva de la resistencia a la compresión en función del tiempo para las 3 mezclas.

Fuente: Autor.

Como se puede evidenciar en la Figura 30 y en la Figura 31 las resistencias a la compresión obtenidas y el porcentaje de evolución de las mismas para los especímenes elaborados a partir de la mezcla 1 con agua potable, se mantuvieron en constante aumento desde

la edad de 7 días hasta los 56 días y principalmente a la edad de 28 días corresponden a 28,39 MPa y 101,41 % respectivamente, lo que indica que se alcanzó la resistencia de diseño establecida, mientras que las resistencias a la compresión obtenidas y el porcentaje de evolución de las mismas para los especímenes elaborados a partir de la mezcla 2 con agua residual doméstica tratada y de la mezcla 3 con agua residual industrial tratada, aunque se mantuvieron en constante aumento desde la edad de 7 días hasta los 56 días respecto a los resultados obtenidos para la mezcla 1 con agua potable, fueron inferiores desde edades tempranas, es decir, pasada la edad de 7 días en adelante las resistencias disminuyen y la edad de 28 días corresponden a 23,47 MPa y 83,8% y 25,35 MPa y 90,5% respectivamente, lo que indica que no se alcanzó la resistencia de diseño establecida.

7. CONCLUSIONES

7.1. Se puede concluir que los tres tipos de agua empleadas agua potable, agua residual doméstica tratada y agua residual industrial tratada, en términos de impurezas inorgánicas en cuanto a cloruros, sulfatos y carbonatos y bicarbonatos de álcalis, cumplen con las recomendaciones respecto a los valores límites permisibles para estas que establece la norma NTC 3459 (ICONTEC, 2001), por lo que se infiere que son aguas aptas para emplear en la elaboración de concreto.

7.2. Como resultado de la evaluación de la resistencia a la compresión desde la edad de 7 días hasta los 56 días de los especímenes elaborados a partir de agua potable, se puede concluir que en virtud de la calidad de los materiales, principalmente el agua, y de la correcta ejecución tanto del procedimiento de dosificación como de elaboración y curado de los especímenes, se logró obtener un concreto con las propiedades requeridas en estado fresco de consistencia y de grado de trabajabilidad y en estado endurecido de resistencia.

7.3. Como resultado de la evaluación de la resistencia a la compresión desde la edad de 7 días hasta los 56 días de los especímenes elaborados a partir de agua residual doméstica tratada y agua residual industrial tratada, se puede concluir que en consecuencia de la calidad de los materiales, principalmente el agua, no se logró obtener un concreto con las propiedades requeridas específicamente en estado endurecido de resistencia, ya que los dos tipos de agua, aunque difieren entre sí, presentan irregularidades en cuanto a propiedades físicas como apariencia, color y olor, por lo que con base en esta condición y respecto a lo que establece la norma NTC 3459 (ICONTEC, 2001) se tiene que son aguas que no se deben emplear a menos de que se tengan registros previos de su implementación en procesos de elaboración de concreto.

7.4. Por ultimo como resultado de la evaluación de la resistencia a la compresión desde la edad de 7 días hasta los 56 días de los especímenes de concreto simple, se puede concluir que con ninguno de los especímenes de las mezclas elaboradas a partir de las aguas residuales tratadas se obtuvieron resistencias similares a los especímenes elaborados a partir de agua potable, lo que indica que no es factible el reemplazo del agua potable por agua residual doméstica tratada ni agua residual industrial tratada en los procesos de producción de concreto, ya que con ellas no se obtuvo el mínimo de resistencia de diseño requerido.

8. RECOMENDACIONES

8.1. En cuanto a la caracterización de las tres muestras de agua se recomienda realizar ensayos para determinar características físicas específicamente el pH, y adicionalmente para evaluar la calidad de agua en cuanto a requisitos físicos se recomienda también realizar ensayos tales como del tiempo de fraguado inicial por el método descrito en la norma NTC 118 (ICONTEC, 2020) y de resistencia a la compresión por el método descrito en la norma NTC 220 (ICONTEC, 2017).

8.2. En relación con la implementación de las aguas residuales tratadas tanto doméstica e industrial en los procesos para elaboración de concreto, se recomienda en el caso específico del agua residual tratada doméstica conseguir una fuente alternativa como por ejemplo una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

8.3. Respecto a la evaluación de la resistencia a la compresión de los especímenes elaborados con las aguas residuales tratadas tanto doméstica e industrial, en vista de que no se obtuvo el mínimo de resistencia de diseño requerido, se recomienda realizar las mezclas de la siguiente manera; la mezcla 1 con 100% de agua potable, ya que es la muestra patrón, la mezcla 2 tanto con agua potable como con agua residual tratada doméstica en proporciones variables y la mezcla 3 tanto con agua potable como con agua residual tratada industrial en proporciones variables.

ANEXOS



biopolab
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

Código: F-69-02
Versión: 2
Fecha: 26/01/2016



**ACREDITADO
ONAC**
LABORATORIO
NIT: 150925 17025-2005
18-LAB-029



**ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.**
SECRETARÍA DE
SALUD DE BOGOTÁ



**INSTITUTO
NACIONAL DE
SALUD**

RESULTADOS DE ANÁLISIS

INFORME DE RESULTADOS N°:				50330				
CLIENTE:	JOHANA ALEJANDRA GÓMEZ SABOGAL			CANTIDAD:	2000ml	RESPONSABLE MUESTREO:	BIOPOLAB	
NIT:	1013681264	COTIZACIÓN N°:	20-1957	FECHA DE MUESTREO:	29/07/2020	TIPO DE ENVASE:	PET	
TELÉFONO:	3123299612	ODS:	20-2719	ID MUESTRA	20-5996	FECHA DE RECIBIDO:	31/07/2020	
CONTACTO:	JOHANA ALEJANDRA GÓMEZ SABOGAL			TIPO DE AGUA:	POTABLE	T (° C) MUESTREO:	N.E	
CARGO:	N.E			LUGAR DE RECOGIDA:	FACATATIVA - CUNDINAMARCA			
DIRECCIÓN:	Cll 67 B Sur Np. 13 - 60			PUNTO DE CAPTACIÓN:	MUESTRA 1 - AGUA POTABLE			
CIUDAD:	BOGOTÁ			ALMAC. CONTRAMUESTRA:	Análisis FQ: 15 días	Análisis MB: 24 horas		
OBSERVACIONES	MUESTRA TOMADA POR EL CLIENTE			Físicoquímica				
FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	Resolución 2115 de 2007 - Agua Potable	CONFORMIDAD
4/08/2020	Cloruros (A)(O)	<10,9	10,9	mgCl ⁻ /L	Argentometric Method.	SM 4500-Cl ⁻ B. Ed 23, 2017.	250	CUMPLE
3/08/2020	Sulfatos (A)(O)	15,0	8,9	mg SO ₄ ²⁻ /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO ₄ ²⁻ E. Ed 23	250	CUMPLE
1/08/2020	Alcalinidad Total (A)(O)	<25,5	25,5	mg CaCO ₃ /L	Titration Method	SM 2320 B Ed 23, 2017	200	CUMPLE
1/08/2020	Alcalinidad Bicarbonatos	<25,5	25,5	mg CaCO ₃ /L	Titrimetric (Titration) Method	SM 2320 B. Ed 23	No Específica	NO APLICA
1/08/2020	Alcalinidad Carbonatos	<25,5	25,5	mg CaCO ₃ /L	Titration Method	SM 2320 B. Ed 23	No Específica	NO APLICA

(O) Parámetro acreditado por ONAC bajo Certificado de Acreditación 18-LAB-029 bajo la norma ISO/IEC-17025:2005.
Formato fecha: dd/mm/yyyy

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía por vía telefónica o vía E-mail para ser atendida.
- La muestra será almacenada 28 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los resultados.

Documento aprobado por:



Javier Eduardo Muñoz Torres
Gerente Técnico
P. Químico de Alimentos. Matrícula Profesional PQA-495

Fecha de expedición: 10/08/2020

FIN DEL INFORME

Elaborado por: Javier Muñoz Torres

Biopolimeros Industriales Ltda.
Carrera 18 No. 63a - 50 Piso 6. Bogotá-Colombia
Teléfonos: (+1) 5405700/5406606, Bogotá
www.biopolab.com

Pag. 1 de 1

RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS N°: 50786

CLIENTE:	JOHANA ALEJANDRA GOMEZ SABOGAL		CANTIDAD:	2000ml	RESPONSABLE MUESTREO:	BIOPOLAB	
NIT:	1013681264	COTIZACIÓN N°:	20-1957	FECHA DE MUESTREO:	29/07/2020	T (* C) MUESTREO:	N.E
TELÉFONO:	3123299612	ODS:	20-2719	FECHA DE RECIBIDO:	31/07/2020	DESCRIPCIÓN:	ARD
CONTACTO:	JOHANA ALEJANDRA GOMEZ SABOGAL		TIPO DE EMPAQUE:	PET	TIPO DE MUESTREO:	PUNTUAL	
CARGO:	N.E		PUNTO DE CAPTACIÓN/ Orden de servicio cliente:	MUESTRA 2 - AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA TRATADA			
DIRECCIÓN:	Cll 67 B Sur Np. 13 - 60		LUGAR DE RECOGIDA:	FACATATIVÁ - CUNDINAMARCA			
CIUDAD:	BOGOTÁ		COORDENADAS:	N: N.E		W: N.E	
ID. MUESTRA:	20-5997		ALMAC. CONTRAMUESTRA:	Análisis FQ: 15 días	Análisis MB: 24 horas		

Físicoquímica

FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	NO SE COMPARA CONTRA NINGUNA NORMA	CONFORMIDAD
4/08/2020	Cloruros (A)(D)	87,8	19,9	mgCl-/L	Argentometric Method	SM 4500-Cl- B. Ed 23; 2017.	No Especifica	NO APLICA
3/08/2020	Sulfatos (A)(D)	33,7	8,9	mg SO42 - /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO4 2- E. Ed 23	No Especifica	NO APLICA
1/08/2020	Alcalinidad Total (A)(D)	498	25,5	mg CaCO3/L	Titration Method	SM 2320 B. Ed 23; 2017	No Especifica	NO APLICA
1/08/2020	Alcalinidad Bicarbonatos	498	25,5	mg CaCO3 /L	Titulometric (Titration) Method	SM 2320 B. Ed 23	No Especifica	NO APLICA
1/08/2020	Alcalinidad Carbonatos	<25,5	25,5	mg CaCO3 /L	Titration Method	SM 2320 B. Ed 23	No Especifica	NO APLICA

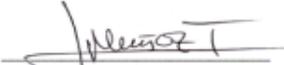
(A) Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 1484 del 2019

* Análisis subcontratados

Formato de fecha: dd/mm/yyyy

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía por vía telefónica o vía E-mail para ser atendida.
- La muestra será almacenada 28 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los resultados.

Documento aprobado por:


Javier Eduardo Muñoz Torres
Gerente Técnico
P. Químico de Alimentos. Matrícula Profesional PQA-495

Fecha de expedición: 24/08/2020

FIN DEL INFORME

Elaborado por: Javier Muñoz Torres

RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS Nº: 50787

CLIENTE:	JOHANA ALEJANDRA GOMEZ SABOGAL	CANTIDAD:	2000ml	RESPONSABLE MUESTREO:	BIOPOLAB
NIT:	1013681264	COTIZACIÓN Nº:	20-1957	FECHA DE MUESTREO:	29/07/2020
TELÉFONO:	3123299612	ODS:	20-2719	FECHA DE RECIBIDO:	31/07/2020
CONTACTO:	JOHANA ALEJANDRA GOMEZ SABOGAL	TIPO DE EMPAQUE:	PET	DESCRIPCIÓN:	ARD
CARGO:	N.E	PUNTO DE CAPTACIÓN/ Orden de servicio cliente:		TIPO DE MUESTREO:	PUNTUAL
DIRECCIÓN:	Cll 67 B Sur Np. 13 - 60	LUGAR DE RECOGIDA:	FACATATIVA - CUNDINAMARCA	MUESTRA 3 - AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL TRTADA	
CIUDAD:	BOGOTÁ	COORDENADAS:	N: N.E	W: N.E	
ID. MUESTRA:	20-5998	ALMAC. CONTRAMUESTRA:	Análisis FQ: 15 días	Análisis MB: 24 horas	

Fisicoquímica

FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	NO SE COMPARA CONTRA NINGUNA NORMA	CONFORMIDAD
4/08/2020	Cloruros (A)(O)	<19,9	19,9	mgCl-/L	Argentometric Method	SM 4500-Cl- B. Ed 23; 2017.	No Especifica	NO APLICA
3/08/2020	Sulfatos (A)(O)	12,9	8,9	mg SO42- /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO4 2- E. Ed 23	No Especifica	NO APLICA
1/08/2020	Alcalinidad Total (A)(O)	99,6	25,5	mg CaCO3 /L	Titration Method	SM 2320 B Ed 23; 2017	No Especifica	NO APLICA
1/08/2020	Alcalinidad Bicarbonatos	99,6	25,5	mg CaCO3 /L	Titulometric (Titration) Method	SM 2320 B. Ed 23	No Especifica	NO APLICA
1/08/2020	Alcalinidad Carbonatos	<25,5	25,5	mg CaCO3 /L	Titration Method	SM 2320 B. Ed 23	No Especifica	NO APLICA

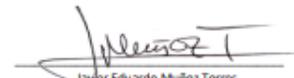
(A) Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 1484 del 2019

* Análisis subcontratados

Formato de fecha: dd/mm/yyyy

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía por vía telefónica o vía E-mail para ser atendida.
- La muestra será almacenada 28 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los resultados.

Documento aprobado por:


Javier Eduardo Muñoz Torres
Gerente Técnico
P. Químico de Alimentos. Matricula Profesional PQA-495

Fecha de expedición: 24/08/2020

FIN DEL INFORME

Elaborado por: Javier Muñoz Torres



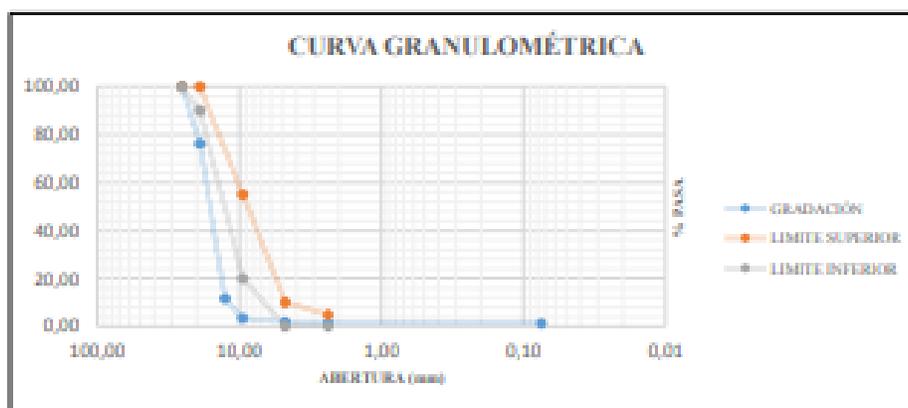
**ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS
FINOS Y GRUESOS**

Procedimiento de ensayo:		Norma técnica de referencia:	NTC 77
--------------------------	--	------------------------------	--------

Cliente:		Fecha del ensayo:	15/07/2020
----------	--	-------------------	------------

Muestra:	GA - 4	P ₁ Peso muestra (g)	3001,00
Agregado proveniente de:		P ₂ Peso muestra seca (g)	2893,00
Descripción del agregado:	Grava 1"	P ₃ Peso muestra lvd./sec.(g)	2856,00

Tamiz (pulg)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
1"	0	0	0	100,00
3/4"	686,0	23,71	23,71	76,29
1/2"	1872,0	64,71	88,42	11,58
3/8"	235,0	8,12	96,54	3,46
No. 4	46,0	1,59	98,13	1,87
No. 8	13,0	0,45	98,58	1,42
No. 200	4,0	0,14	98,72	1,28
Fondo	37,0	1,28	100,00	0
Total	2893,0	100,00	-	



<i>TM</i>	Tamaño máximo	1"
<i>TMN</i>	Tamaño máximo nominal	3/4"
<i>H</i>	Humedad natural (%)	3,73

Observaciones: _____

Alejandra Gómez S.

Alejandra Gómez S.
Técnico de Laboratorio

E. D.

Ing. Elquier Duza R.
Director de Laboratorio



**DENSIDAD VOLUMÉTRICA (MASA UNITARIA) Y
VACIOS EN AGREGADOS**

Procedimiento de ensayo:		Norma técnica de referencia:	NTC 92
--------------------------	--	------------------------------	--------

Cliente:		Fecha del ensayo:	15/07/2020
----------	--	-------------------	------------

Muestra:	GA - 4	Masa molde (g)	1533,00
Agregado proveniente de:		Volumen del molde (cm ³)	2981,00
Descripción del agregado:	Grava 1"	Diámetro (cm)	
Referencia:		Altura (cm)	

MASA UNITARIA SUELTA

Ensayo No.	1	2	3	Promedio
Masa del agregado + molde (g)	5739,0	5734,0	5735,0	5736,0
Masa del agregado (g)	4206,0	4201,0	4202,0	4203,0
Masa unitaria suelta (g/cm ³)	1,411	1,409	1,410	1,410

MASA UNITARIA COMPACTA

Ensayo No.	1	2	3	Promedio
Masa del agregado + molde (g)	5910,0	5902,0	5910,0	5907,3
Masa del agregado (g)	4377,0	4369,0	4377,0	4374,3
Masa unitaria compacta (g/cm ³)	1,468	1,466	1,468	1,467

MUS	Masa unitaria suelta promedio (g/cm ³)	1,41
MUC	Masa unitaria compacta promedio (g/cm ³)	1,47

Observaciones:

Alejandra Gómez

Alejandra Gómez S.
Técnico de Laboratorio

E. Daza

Ing. Elquier Daza R.
Director de Laboratorio



**DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y
LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO**

Procedimiento de ensayo:		Norma técnica de referencia:	NTC 176
--------------------------	--	------------------------------	---------

Cliente:		Fecha del ensayo:	15/07/2020
----------	--	-------------------	------------

Muestra:	GA - 4	A Peso en aire de muestra seca (g)
Agregado proveniente de:		B Peso en aire de muestra SSS (g)
Descripción del agregado:	Grava 1"	C Peso de la muestra sumergida (g)
Referencia:		G _r Densidad relativa (g/cm ³)

Ensayo No.	1	2	3
A (g)	4800,0		
B (g)	5001,0		
C (g)	2902,0		
B - C (g)	2099,0		
A - C (g)	1898,0		
B - A (g)	201,0		
G _s SH $\left[\frac{A}{(B - C)} \right]$ (g/cm ³)	2,29		
G _s SSS $\left[\frac{B}{(B - C)} \right]$ (g/cm ³)	2,38		
G _s Aparente $\left[\frac{A}{(A - C)} \right]$ (g/cm ³)	2,53		
% Absorción $\left[\frac{(B - A)}{A} \right] \times 100$	4,19		

Observaciones: _____

Alejandra Gómez

Alejandra Gómez S.
Técnico de Laboratorio

EE.D

Ing. Elquier Daza R.
Director de Laboratorio



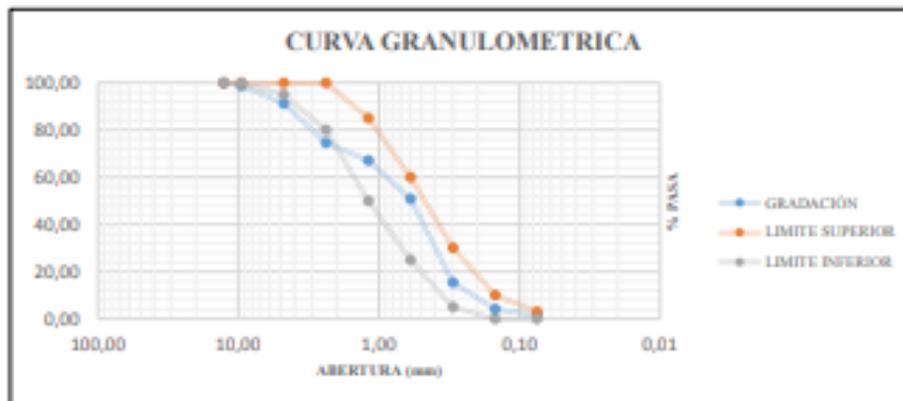
ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS

Procedimiento de ensayo: _____ Norma técnica de referencia: NTC 77

Ciente: _____ Fecha del ensayo: 15/07/2020

Muestra:	AA - 1	P ₁ Peso muestra (g)	1500
Agregado proveniente de:		P ₂ Peso muestra seca (g)	1482
Descripción del agregado:	Arena de río	P ₃ Peso muestra lvd./sec.(g)	1458

Tamiz (pulg)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
1/2"	0	0	0	100,00
3/8"	18,0	1,21	1,21	98,79
No. 4	113,0	7,62	8,84	91,16
No. 8	245,0	16,53	25,37	74,63
No. 16	112,0	7,56	32,93	67,07
No. 30	241,0	16,26	49,19	50,81
No. 50	525,0	35,43	84,62	15,38
No. 100	168,0	11,34	95,95	4,05
No. 200	35,0	2,36	98,31	1,69
Fondo	25,0	1,69	100,00	0
Total	1482,0	100,00	-	-



MF	Módulo de finura	2,98
H	Humedad natural	1,21

Observaciones: _____

Alejandra Gómez

Alejandra Gómez S.
Técnico de Laboratorio

E. Daza

Ing. Elquier Daza R.
Director de Laboratorio



**DENSIDAD VOLUMÉTRICA (MASA UNITARIA) Y
VACIOS EN AGREGADOS**

Procedimiento de ensayo:		Norma técnica de referencia:	NTC 92
--------------------------	--	------------------------------	--------

Cliente:		Fecha del ensayo:	15/07/2020
----------	--	-------------------	------------

Muestra:	AA - 1	Masa molde (g)	1533
Agregado proveniente de:		Volumen del molde (cm ³)	2981
Descripción del agregado:	Arena de río	Diámetro (cm)	
Referencia:		Altura (cm)	

MASA UNITARIA SUELTA

Ensayo No.	1	2	3	Promedio
Masa del agregado + molde (g)	6489,0	6486,0	6482,0	6485,7
Masa del agregado (g)	4956,0	4953,0	4949,0	4952,7
Masa unitaria suelta (g/cm ³)	1,663	1,662	1,660	1,661

MASA UNITARIA COMPACTA

Ensayo No.	1	2	3	Promedio
Masa del agregado + molde (g)	6710,0	6754,0	6755,0	6739,7
Masa del agregado (g)	5177,0	5221,0	5222,0	5206,7
Masa unitaria compacta (g/cm ³)	1,737	1,751	1,752	1,747

MUS	Masa unitaria suelta promedio (g/cm ³)	1,66
MUC	Masa unitaria compacta promedio (g/cm ³)	1,75

Observaciones: _____

Alejandra Gómez

Alejandra Gómez S.
Técnico de Laboratorio

E. Daza

Ing. Elquier Daza R.
Director de Laboratorio



**DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA)
Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO**

Procedimiento de ensayo: _____ Norma técnica de referencia: NTC 237

Cliente: _____ Fecha del ensayo: 15/07/2020

Muestra:	AA - 1	A Peso en aire de muestra seca (g)
Agregado proveniente de:		V Peso del picnómetro (g)
Descripción del agregado:	Arena de río	W Peso agua, picnómetro y muestra (g)
Referencia:		G _r Densidad relativa (g/cm ³)

Ensayo No.	1	2	3
A (g)	491,0		
V (g)	500,0		
W (g)	308,0		
V - W (g)	192,0		
500 - A (g)	9,0		
[(V - W) - (500 - A)]	183,0		
G _s SH $\left[\frac{A}{(V - W)} \right] (g/cm^3)$	2,56		
G _s SSS $\left[\frac{500}{(V - W)} \right] (g/cm^3)$	2,60		
G _s Aparente $[A / (V - W) - (500 - A)] (g/cm^3)$	2,69		
% Absorción $\left[\frac{(500 - A)}{A} \right] \times 100$	1,83		

Observaciones: _____

Alejandra Gómez

Alejandra Gómez S.
Técnico de Laboratorio

E. D.

Ing. Elquier Daza R.
Director de Laboratorio



DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO

Procedimiento de ensayo: _____ Norma técnica de referencia: NTC 221

Cliente: _____ Fecha del ensayo: 15/07/2020

Muestra: Cemento Portland Temperatura ambiente(° C) _____
Líquido utilizado: Kerosene Referencia: _____

Ensayo No.	1	2	3
Masa cemento (g)	64,00		
Volumen inicial (cm ³)	0,80		
Volumen final (cm ³)	22,50		
Peso específico (g/cm ³)	2,95		

Observaciones: _____

Alejandra Gómez

Alejandra Gómez S.
Técnico de Laboratorio

E. D.

Ing. Elquier Daza R.
Director de Laboratorio

ELABORACIÓN ESPECIMENES CON AGUA POTABLE (MEZCLA 1)



ELABORACIÓN ESPECIMENES CON AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA TRATADA (MEZCLA 2)

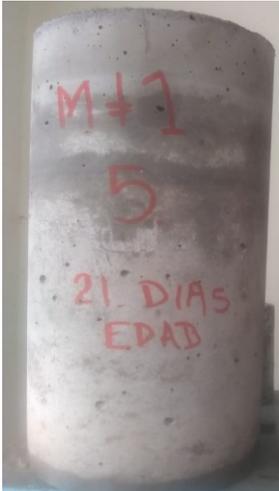


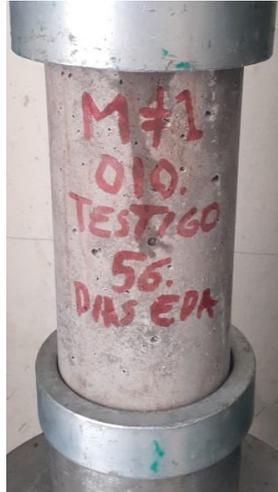
ELABORACIÓN ESPECIMENES CON AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL TRATADA (MEZCLA 3)



**ENSAYO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS ESPECIMENES ELABORADOS CON AGUA
POTABLE (MEZCLA 1)**

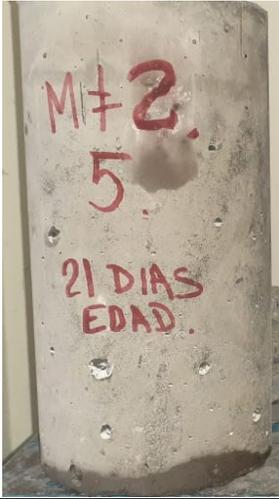
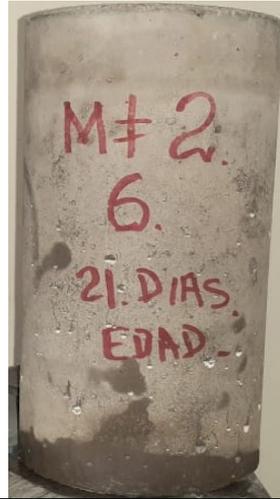
Edad	Especimen No. 1 antes del ensayo	Especimen No. 1 después del ensayo	Especimen No. 2 antes del ensayo	Especimen No. 2 después del ensayo
7 días				
14 días				

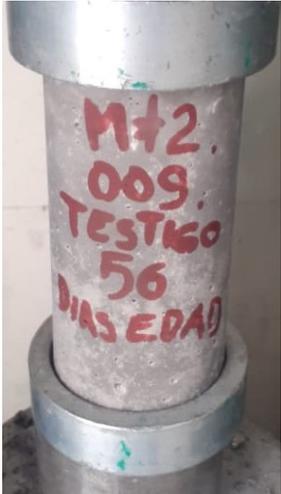
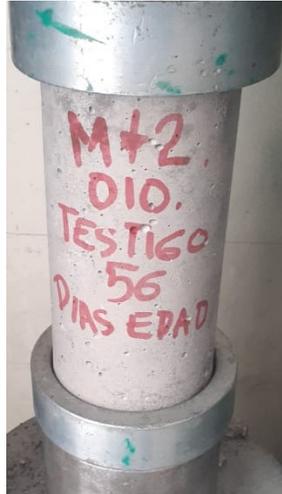
Edad	Especimen No. 1 antes del ensayo	Especimen No. 1 después del ensayo	Especimen No. 2 antes del ensayo	Especimen No. 2 después del ensayo
21 días	 <p>M+1 5 21 DIAS EDAD</p>	 <p>M+1 5 21 DIAS EDAD</p>	 <p>M+1 5 21 DIAS EDAD</p>	 <p>M 6 21 DIAS EDAD</p>
28 días	 <p>M+1 7 28 DIAS EDAD</p>	 <p>M+1 8 28 DIAS EDAD</p>	 <p>M+1 8 28 DIAS EDAD</p>	 <p>M+1 8 28 DIAS EDAD</p>

Edad	Espécimen No. 1 antes del ensayo	Espécimen No. 1 después del ensayo	Espécimen No. 2 antes del ensayo	Espécimen No. 2 después del ensayo
56 días	 <p>A cylindrical concrete specimen with red markings: "M#1", "009", "TESTIGO", and "56. DIAS". It is mounted on a metal base.</p>	 <p>The same specimen as in the previous image, but with a vertical crack visible on the right side.</p>	 <p>A cylindrical concrete specimen with red markings: "M#1", "010", "TESTIGO", "56. DIAS", and "EPA". It is mounted on a metal base.</p>	 <p>The same specimen as in the previous image, but with a significant vertical crack and some surface spalling on the right side.</p>

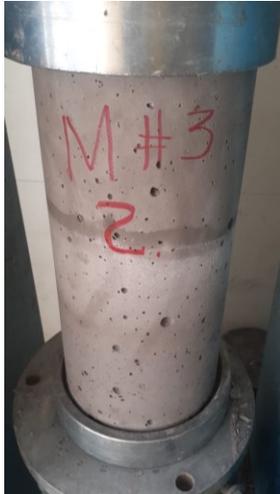
**ENSAYO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS ESPECIMENES ELABORADOS CON AGUA
RESIDUAL DOMÉSTICA TRATADA (MEZCLA 2)**

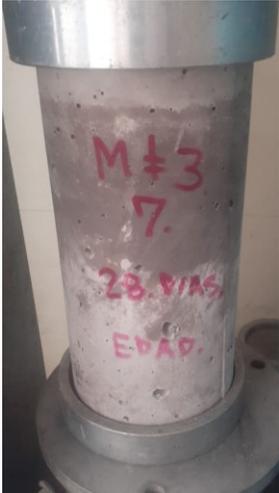
Edad	Espécimen No. 1 antes del ensayo	Espécimen No. 1 después del ensayo	Espécimen No. 2 antes del ensayo	Espécimen No. 2 después del ensayo
7 días	 A cylindrical concrete specimen, 7 days old, marked with red ink as "M#2 1". It is mounted in a metal testing fixture and shows a smooth, uncracked surface.	 The same specimen after a compression test. It shows significant vertical cracking and a large portion of the concrete has been crushed and spalled at the bottom.	 A cylindrical concrete specimen, 7 days old, marked with red ink as "M#2 2". It is mounted in a metal testing fixture and shows a smooth, uncracked surface.	 The same specimen after a compression test. It shows vertical cracking and some surface spalling, but the overall structure remains more intact than specimen 1.
14 días	 A cylindrical concrete specimen, 14 days old, marked with red ink as "M#2 3". It is mounted in a metal testing fixture and shows a smooth, uncracked surface.	 The same specimen after a compression test. It shows vertical cracking and some surface spalling.	 A cylindrical concrete specimen, 14 days old, marked with red ink as "M#2 4". It is mounted in a metal testing fixture and shows a smooth, uncracked surface.	 The same specimen after a compression test. It shows significant vertical cracking and a large portion of the concrete has been crushed and spalled at the bottom.

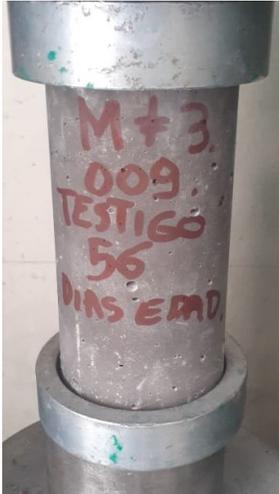
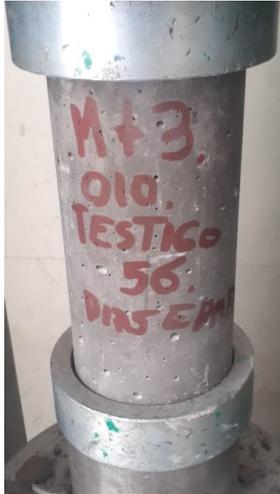
Edad	Especimen No. 1 antes del ensayo	Especimen No. 1 después del ensayo	Especimen No. 2 antes del ensayo	Especimen No. 2 después del ensayo
21 días	 <p>M#2. 5. 21 DIAS EDAD.</p>	 <p>M#2. 5. 21 DIAS EDAD.</p>	 <p>M#2. 6. 21 DIAS. EDAD.</p>	 <p>M#2. 6. 21 DIAS. EDAD.</p>
28 días	 <p>M#2. 7. 28 DIAS EDAD.</p>	 <p>M#2. 7. 28 DIAS EDAD.</p>	 <p>M#2. 8. 28 DIAS EDAD.</p>	 <p>M#2. 8. 28 DIAS EDAD.</p>

Edad	Espécimen No. 1 antes del ensayo	Espécimen No. 1 después del ensayo	Espécimen No. 2 antes del ensayo	Espécimen No. 2 después del ensayo
56 días				

ENSAYO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS ESPECIMENES ELABORADOS CON AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL TRATADA (MEZCLA 3)

Edad	Espécimen No. 1 antes del ensayo	Espécimen No. 1 después del ensayo	Espécimen No. 2 antes del ensayo	Espécimen No. 2 después del ensayo
7 días				
14 días				

Edad	Especimen No. 1 antes del ensayo	Especimen No. 1 después del ensayo	Especimen No. 2 antes del ensayo	Especimen No. 2 después del ensayo
21 días	 <p>M#3 5 21 DIAS EDAD.</p>	 <p>M#3 5 21 DIAS EDAD.</p>	 <p>M#3 6 21 DIAS EDAD.</p>	 <p>M#3 6 21 DIAS EDAD.</p>
28 días	 <p>M#3 7 28 DIAS EDAD.</p>	 <p>M#3 7 28 DIAS EDAD.</p>	 <p>M#3 8 28 DIAS EDAD.</p>	 <p>M#3 8 28 DIAS EDAD.</p>

Edad	Espécimen No. 1 antes del ensayo	Espécimen No. 1 después del ensayo	Espécimen No. 2 antes del ensayo	Espécimen No. 2 después del ensayo
56 días	 <p>A cylindrical concrete specimen mounted on a metal base. Handwritten in red ink: "M+3", "009.", "TESTIGO", "56", "DÍAS EDAD".</p>	 <p>The same cylindrical concrete specimen after a test, showing a large, jagged fracture on the top surface. Handwritten in red ink: "M+3", "009.", "TESTIGO", "56", "DÍAS EDAD".</p>	 <p>A cylindrical concrete specimen mounted on a metal base, identical to specimen No. 1. Handwritten in red ink: "M+3", "010.", "TESTIGO", "56", "DÍAS EDAD".</p>	 <p>The same cylindrical concrete specimen after a test, showing a large, jagged fracture on the top surface, similar to specimen No. 1. Handwritten in red ink: "M+3", "010.", "TESTIGO", "56", "DÍAS EDAD".</p>



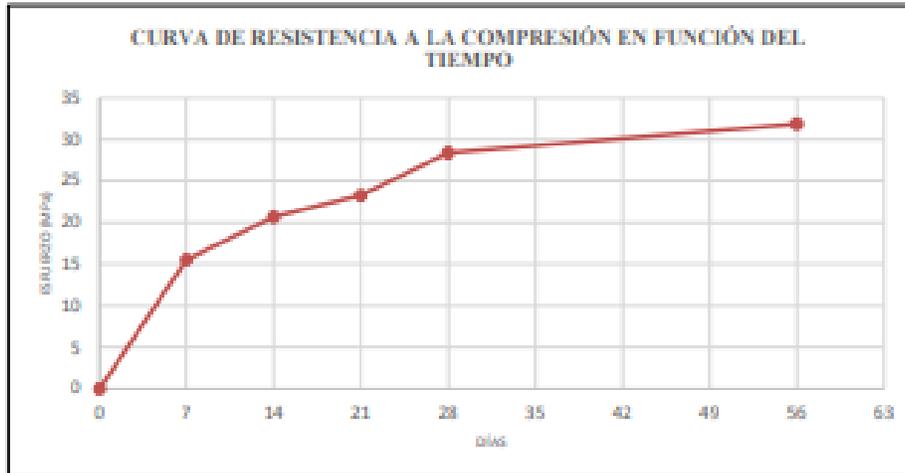
**ENSAYO DE LA RESISTENCIA A LA
COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS
DE CONCRETO**

Procedimiento de ensayo: _____ Norma técnica de referencia: NTC 673

Cliente: _____ Fecha de toma: 18/08/2020

Resistencia del concreto f_c (MPa) 28 Referencia: Mezcla 1

Edad (Días)	Diámetro (cm)	Área (m ²)	Especimen No. 1 (kN)	Especimen No. 2 (kN)	Promedio (kN)	Resistencia (MPa)
7,0	15,05	0,0178	281,20	272,10	276,65	15,55
14,0	15,10	0,0179	379,80	361,70	370,75	20,70
21,0	15,08	0,0179	414,20	416,80	415,50	23,26
28,0	15,20	0,0181	511,30	519,20	515,25	28,39
56,0	15,15	0,0180	574,50	573,80	574,15	31,85



Observaciones: _____

Alejandra Gómez S.

Alejandra Gómez S.
Técnico de Laboratorio

Elquier Daza R.

Ing. Elquier Daza R.
Director de Laboratorio



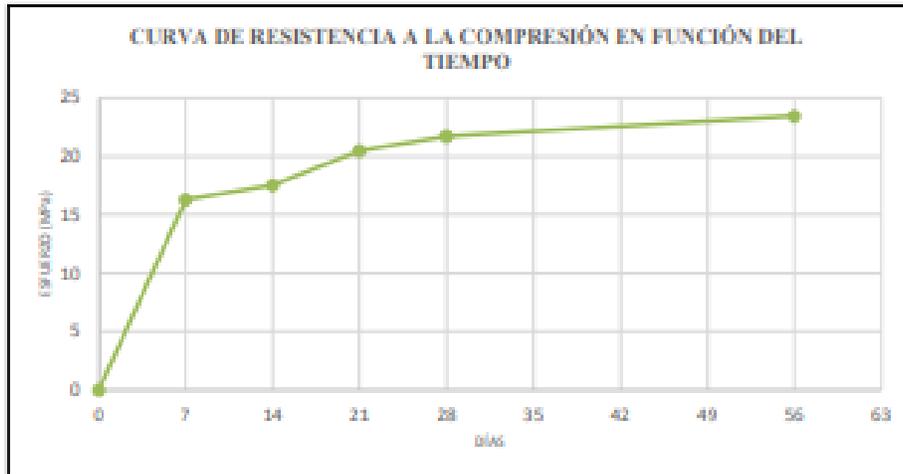
ENSAYO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO

Procedimiento de ensayo: _____ Norma técnica de referencia: NTC 673

Cliente: _____ Fecha de toma: 18/08/2020

Resistencia del concreto f'_c (MPa) 28 Referencia: Mezcla 2

Edad (Días)	Diámetro (cm)	Área (m ²)	Especimen No. 1 (kN)	Especimen No. 2 (kN)	Promedio (kN)	Resistencia (MPa)
7	15,10	0,0179	290,8	292,2	291,5	16,28
14	15,08	0,0179	326,9	300,1	313,5	17,55
21	15,14	0,0180	360,2	377,7	369,0	20,49
28	15,06	0,0178	389,1	385,0	387,1	21,73
56	15,20	0,0181	427,6	424,0	425,8	23,47



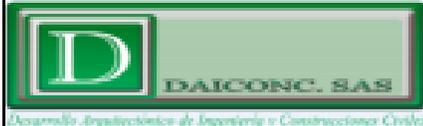
Observaciones: _____

Alejandra Gómez S.

Alejandra Gómez S.
Técnico de Laboratorio

EE. DR

Ing. Elquier Daza R.
Director de Laboratorio



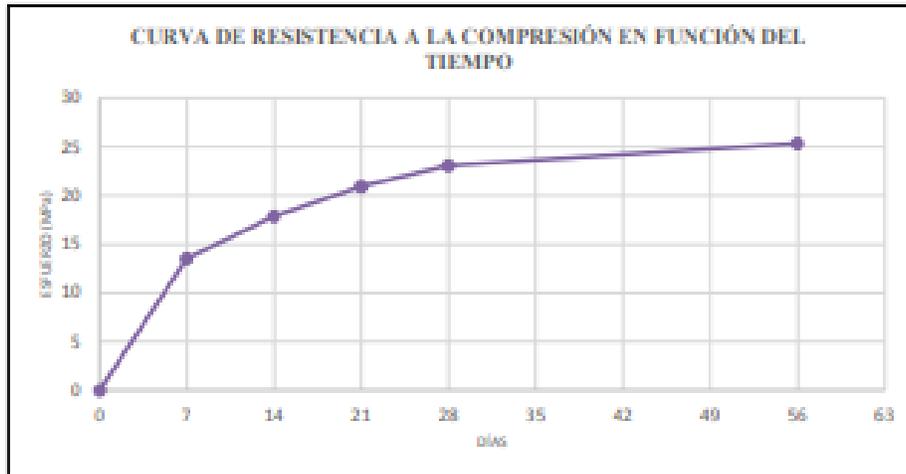
**ENSAYO DE LA RESISTENCIA A LA
COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS
DE CONCRETO**

Procedimiento de ensayo: _____ Norma técnica de referencia: NTC 673

Cliente: _____ Fecha de toma: 18/08/2020

Resistencia del concreto f_c (MPa) 28 Referencia: Mezcla 3

Edad (Días)	Diámetro (cm)	Área (m ²)	Especimen No. 1 (kN)	Especimen No. 2 (kN)	Promedio (kN)	Resistencia (MPa)
7	15,18	0,0181	254,6	234,5	244,6	13,51
14	15,15	0,0180	313,6	330,2	321,9	17,86
21	15,20	0,0181	375,4	383,9	379,7	20,92
28	15,08	0,0179	412,2	412,5	412,4	23,09
56	15,10	0,0179	459,8	448,0	453,9	25,35



Observaciones: _____

Alejandra Gómez S.

Alejandra Gómez S.
Técnico de Laboratorio

E. D.

Ing. Elquier Duza R.
Director de Laboratorio

BIBLIOGRAFIA

- Ahmed, R. y Afifi, M. (2019). Utilizing industrial wastewater in production of concrete: Experimental & feasibility study. *Conferencia Anual de la Sociedad Canadiense de Ingeniería Civil*. Canadá: Sociedad Canadiense de Ingeniería Civil.
- Ahmed, S., Alhoubi, Y., Elmesalami, N., Yehia, S., & Abed, F. (2020). Effect of recycled aggregates and treated wastewater on concrete subjected to different exposure conditions. *Construction and Building Materials*.
- Alcaldía Municipal de Facatativá. (14 de 08 de 2020). *Decreto No. 178*. Obtenido de Empresa Aguas de Facatativá EAF S.A.S ESP.: https://aguasfacatativa.micolombiadigital.gov.co/sites/aguasfacatativa/content/files/000297/14844_decreto-178-de-2020.pdf
- Al-Joulani, N. (2015). Effect of waste water type on concrete properties. *International Journal of Applied Engineering Research*, 39865-39870.
- Al-Joulani, N. (2019). Effect of using tertiary treated wastewater from nablus wastewater treatment plant (NWWTP), on some properties of concrete. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2460-2466.
- Asadollahfardi, G., & Mahdavi, A. (2019). The feasibility of using treated industrial wastewater to produce concrete. *Structural Concrete*, 123-132.
- Asadollahfardi, G., Delnavaz, M., Rashnoiee, V., & Ghonabadi, N. (2015). Use of treated domestic wastewater before chlorination to produce and cure concrete. *Construction and Building Materials*, 253 - 261.
- Asadollahfardi, G., Delnavaz, M., Rashnoiee, V., Fazeli, A., & Gonabadi, N. (01 de 03 de 2016). Dataset of producing and curing concrete using domestic treated wastewater. *Data in Brief*, págs. 316-325.
- Asadollahfardi, G., Tahmasabi, G., Nabi, S., Pouresfandyani, H., & Hossieni, S. (2017). Effects of using concrete wash water on a few characteristics of new concrete. *Environmental Engineering and Management Journal*, 1569-1575.
- Castañeda, M. C. (10 de 2015). *Propuesta para la implementación de técnicas alternativas con ayudantes de coagulación naturales en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de la Empresa Aguas de Facatativá*. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/6913/Casta%F1edaCortesMariaCamila2015.pdf;jsessionid=3575B28A0258FDE66DE14EC38A0AD264?sequence=1>
- FCEA, F. p. (2017). *Agua en el planeta*. Obtenido de Agua.org.mx Centro Virtual de Información del Agua.: <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>
- Ghraid, A., & Al-Mashaqbeh, O. (2019). Water reuse in the production of non-reinforced concrete elements: An alternative for decentralized wastewater management . *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 596-600.
- Ghraid, A., Al-Mashaqbeh, O., Sarireh, M., Al-Kouz, N., Farfoura, M., & Megdal, S. (2018). Influence of grey water on physical and mechanical properties of mortar and concrete mixes. *Ain Shams Engineering Journal*, 1519-1525.
- Ghraid, A.M. y Al-Mashaqbeh, O. (2016). Domestic wastewater reuse in concrete using bench-scale testing and full-scale implementation. *Water (Switzerland)*.

- ICONTEC, I. C. (15 de 06 de 1994). *Norma Técnica Colombiana NTC 1028 Determinación del contenido de aire en concreto fresco. Método volumétrico.* . Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=359>
- ICONTEC, I. C. (15 de 06 de 1994). *Norma Técnica Colombiana NTC 1294 Método de ensayo para determinar la exudación del concreto* . Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=611>
- ICONTEC, I. C. (29 de 11 de 1995). *Norma Técnica Colombiana NTC 3752. Método de ensayo para determinar el contenido de agua en el concreto fresco.* Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=2816>
- ICONTEC, I. C. (31 de 10 de 2001). *Norma Técnica Colombiana NTC 3459. Concretos. Agua para la elaboración de concreto.* Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=2520>
- ICONTEC, I. C. (15 de 12 de 2010). *Norma Técnica Colombiana NTC 1377. Ingeniería Civil y Arquitectura. Elaboración y curado de los especímenes cilíndricos de concreto simple para ensayos en el laboratorio.* Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=684>
- ICONTEC, I. C. (17 de 02 de 2010). *Norma Técnica Colombiana NTC 673. Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.* Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=5672>
- ICONTEC, I. C. (15 de 05 de 2013). *Norma Técnica Colombiana NTC 1032. Método de ensayo para la determinación del contenido de aire en el concreto fresco. Método de presión.* Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=363>
- ICONTEC, I. C. (12 de 11 de 2013). *Norma Técnica Colombiana NTC 1926 Método de ensayo para determinar la densidad (masa unitaria), el rendimiento y el contenido de aire por gravimetría del concreto.* Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=1172>
- ICONTEC, I. C. (18 de 06 de 2014). *Norma Técnica Colombiana NTC 121 Especificación de desempeño cemento hidráulico.* Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=520>
- ICONTEC, I. C. (16 de 08 de 2017). *Norma Técnica Colombiana NTC 220 Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado.* Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=1442>
- ICONTEC, I. C. (21 de 11 de 2018). *Norma Técnica Colombiana NTC 174. Especificaciones de los agregados para concreto.* Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=75361>
- ICONTEC, I. C. (17 de 10 de 2018). *Norma Técnica Colombiana NTC 396 Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto.* Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=75200>
- ICONTEC, I. C. (12 de 09 de 2018). *Norma Técnica Colombiana NTC 77. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.* Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=5759>
- ICONTEC, I. C. (27 de 08 de 2019). *Norma Técnica Colombiana NTC 107 Método de ensayo para determinar la expansión en autoclave del cemento hidráulico.* Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=76219>

- ICONTEC, I. C. (20 de 03 de 2019). *Norma Técnica Colombiana NTC 110 Cantidad de agua requerida para la consistencia normal de una pasta de cemento hidráulico*. Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=75782>
- ICONTEC, I. C. (16 de 10 de 2019). *Norma Técnica Colombiana NTC 176. Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso*. Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=76463>
- ICONTEC, I. C. (27 de 08 de 2019). *Norma Técnica Colombiana NTC 221. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico*. Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=76225>
- ICONTEC, I. C. (11 de 12 de 2019). *Norma Técnica Colombiana NTC 297 Método de ensayo para determinar el endurecimiento temprano del cemento hidráulico (método de la pasta)*. Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=76864>
- ICONTEC, I. C. (11 de 12 de 2019). *Norma Técnica Colombiana NTC 33 Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire*. Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=76871>
- ICONTEC, I. C. (22 de 05 de 2019). *Norma Técnica Colombiana NTC 890 Determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto por medio de su resistencia a la penetración*. Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=75960>
- ICONTEC, I. C. (20 de 03 de 2019). *Norma Técnica Colombiana NTC 92 Método de ensayo para la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en los agregados*. Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=75780>
- ICONTEC, I. C. (15 de 07 de 2020). *Norma Técnica Colombiana NTC 118 Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante aguja de Vicat*. Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=78873>
- ICONTEC, I. C. (15 de 07 de 2020). *Norma Técnica Colombiana NTC 237. Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino*. Obtenido de <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=78874>
- Kaboosi, K., & Emami, K. (2019). Interaction of treated industrial wastewater and zeolite on compressive strength of plain concrete in different cement contents and curing ages. *Case Studies in Construction Materials*.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanes, J. (2004). *Diseño y control de Mezclas de Concreto*. Estados Unidos: Portland Cement Association PCA.
- Linares, A. S., & Cerón, M. J. (2016). Efectos en la resistencia del hormigón simple elaborados con agua residual tratada proveniente de la PTAR Cañaveralejo. *Revista Ingeniería y Región*, 35 - 48.
- MPS, M. d., & MAVDT, M. d. (2007). *Resolución número 2115*. Bogotá D.C.
- Niño, J. R. (2010). *Tecnología de Concreto Tomo I. Materiales, Propiedades y Diseños de Mezclas*. Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de Concreto ASOCRETO.

- Peighambarzadeh, F., Asadollahfardi, G., & Akbaridoost, J. (2020). The effects of using treated wastewater on the fracture toughness of the concrete. *Australian Journal of Civil Engineering*, 56-64.
- Raza, A., Shah, S. A., Kazmi, S. N., Ali, R. Q., Akhtar, H., Fakhar, S., . . . Mahmood, A. (2020). Performance evaluation of concrete developed using various types of wastewater: A step towards sustainability. *Construction and Building Materials*.
- Sánchez, D. D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*.
- Standard Methods. (2017). *S.M. 2320 B. Alkalinity. Titration Method*. Obtenido de Standard Methods Online. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.: <http://standardmethods.org>
- Standard Methods. (2017). *S.M. 4500 Cl^- Chloride. Argentometric Method*. Obtenido de Standard Methods Online. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.: <http://standardmethods.org>
- Standard Methods. (2017). *S.M. 4500 SO_4^{2-} Sulfate. Turbidimetric Method*. Obtenido de Standard Methods Online. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.: <http://standardmethods.org>