



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A  
CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE  
METACAOLÍN

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A  
CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE  
METACAOLÍN

**PRESENTADO POR:**

NOMBRE: YULIEHT ANGELICA GACHA ROJAS      CÓDIGO: 505968  
NOMBRE: CHRISTIAN MAURICIO VELASCO GUEVARA      CÓDIGO: 505829

**DIRECTOR:**

ING. CAMILO HIGUERA FLÓREZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA  
COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO

COMPORTAMIENTO FÍSICO -  
MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A  
CLORUROS EN EL CONCRETO  
HIDRÁULICO CON ADICIONES DE  
METACAOLÍN

FECHA: MAY-2019

VERSIÓN 0



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

**Usted es libre de:**



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

**Bajo las condiciones siguientes:**



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA  
COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO

COMPORTAMIENTO FÍSICO -  
MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A  
CLORUROS EN EL CONCRETO  
HIDRÁULICO CON ADICIONES DE  
METACAOLÍN

FECHA: MAY-2019

VERSIÓN 0

**NOTA DE ACEPTACIÓN:**

---

---

---

---

---

---

---

\_\_\_\_\_  
**FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO**

\_\_\_\_\_  
**FIRMA JURADO**

\_\_\_\_\_  
**FIRMA JURADO**

**BOGOTA D.C.**

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	---

## DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado principalmente a Dios, quien me dio la paz, fuerza y fortaleza para saltar cualquier obstáculo y hoy estar culminando uno de mis sueños.

A mis padres y hermanos, porque me dieron fuerza, apoyo, compañía y perseverancia quienes con su trabajo, sacrificio y amor en estos años ayudaron a sacar adelante este gran logro.

A mi esposo por estar siempre presente, quien me brindó su amor, su cariño, y apoyo constante. Su comprensión y paciente para que pudiera culminar el grado son evidencia de su gran amor.

A todas las personas que nos han dado su apoyo, que han hecho posible que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos para ser unos mejores ingenieros.

*Autor: Yulieht Angelica Gacha Rojas*

Este trabajo está dedicado a Dios que me ha iluminado a lo largo del camino, que me ha dado la oportunidad de ser valiente y luchar por mis sueños y metas, a mis padres que nunca han dejado de creer en mí y siempre me han dado su amor incondicional.

A los maestros que me han brindado su conocimiento, su paciencia y su pasión para infundir en mí el conocimiento, que hoy en día me inspiran a buscar ser mejor, más sabio, mejor persona y profesional cada día y en cada circunstancia.

*Autor: Christian Mauricio Velasco Guevara*

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	---

## AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mi madre Aura Guevara, por su apoyo, por la compañía en esas largas noches de estudio, por sus ánimos para esos días de arduo trabajo y estudio, por enseñarme que el estudio y el conocimiento son el camino para ayudar a que el mundo sea un lugar mejor.

A mi familia por creer en mí, a mis amigos que han sido una base moral fuerte para luchar por un mejor mañana, a las personas y empresas con las que he trabajado, que dieron los espacios y horarios para poder seguir estudiando y trabajando al mismo tiempo.

*Autor: Christian Mauricio Velasco Guevara*

Agradezco a Dios por bendecir mi estudio, por guiarnos a lo largo de este camino de lucha, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Gracias a mis padres: Sonia y Fernando, por ser los principales promotores de todos los sueños, por confiar y creer en cada expectativa, por los consejos, valores y principios que han inculcado.

Agradecemos a nuestros docentes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de nuestra profesión, por la entrega de nuestro tutor en el proyecto de investigación quien ha guiado con su paciencia, y rectitud como docente.

*Autor: Yulieht Angelica Gacha Rojas*

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	---

## Tabla de contenido

<b>RESUMEN</b> .....	<b>14</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>15</b>
<b>1. GENERALIDADES</b> .....	<b>16</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	16
1.1.1 <i>Concreto adicionado con metacaolín: comportamiento a carbonatación y cloruros</i> .....	16
1.1.2 <i>Especificaciones materiales NSR 10</i> .....	17
1.1.3 <i>Agregados</i> .....	18
1.1.4 <i>Planteamiento del problema</i> .....	18
1.2 OBJETIVOS .....	19
1.2.1 <i>Objetivo general</i> .....	19
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	19
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	20
1.4 DELIMITACIÓN .....	21
1.4.1 <i>Espacio</i> .....	21
1.4.2 <i>Tiempo</i> .....	21
1.4.3 <i>Contenido</i> .....	21
1.4.4 <i>Alcance</i> .....	21
1.5 MARCO REFERENCIAL .....	22
1.5.1 <i>Marco teórico</i> .....	22
1.5.2 <i>Marco conceptual</i> .....	32
1.5.3 <i>Marco legal</i> .....	35
1.6 METODOLOGÍA.....	37
1.6.1 <i>Tipo de Estudio</i> .....	37
<b>2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS</b> .....	<b>38</b>
2.1 AGREGADO.....	38
2.1.1 <i>Humedad Natural</i> .....	38
2.1.2 <i>Absorción</i> .....	38
2.1.3 <i>Densidad</i> .....	39
2.1.4 <i>Masa unitaria suelta</i> .....	40
2.1.5 <i>Masa unitaria compactada</i> .....	41
2.1.6 <i>Granulometrías del agregado</i> .....	41
2.1.7 <i>Fotografías del agregado</i> .....	45
2.1.8 <i>Fotografías microscópicas del agregado</i> .....	46
2.1.9 <i>Prueba de fluorescencia de rayos X</i> .....	47



2.2	CEMENTO.....	48
2.2.1	<i>Parámetros físicos y químicos del cemento</i> .....	48
2.2.2	<i>Prueba de fluorescencia de rayos X</i> .....	48
2.3	METACAOLÍN .....	49
2.3.1	<i>Caracterización química del metacaolín</i> .....	49
2.3.2	<i>Caracterización física del metacaolín</i> .....	50
<b>3.</b>	<b>DISEÑO DE MEZCLAS</b> .....	<b>51</b>
<b>4.</b>	<b>ELABORACIÓN DE MUESTRAS</b> .....	<b>53</b>
4.1	ELABORACIÓN DE MUESTRAS CILÍNDRICAS DE MORTERO .....	53
4.1.1	<i>Procedimiento:</i> .....	53
4.2	ELABORACIÓN DE MUESTRAS CUBICAS DE MORTERO.....	56
<b>5.</b>	<b>ENSAYOS DE MUESTRAS</b> .....	<b>58</b>
5.1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	58
5.1.1	<i>Registro fotográfico</i> .....	59
5.2	DENSIDAD, ABSORCIÓN Y RELACIÓN DE VACÍOS.....	59
5.2.1	<i>Registro fotográfico</i> .....	61
5.3	SORTIVIDAD.....	61
5.3.1	<i>Registro fotográfico</i> .....	62
5.4	COEFICIENTE DE MIGRACIÓN DE CLORUROS.....	62
5.4.1	<i>Registro fotográfico</i> .....	63
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	<b>65</b>
6.1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	65
6.1.1	<i>Resultados</i> .....	65
6.1.2	<i>Análisis</i> .....	66
6.2	DENSIDAD, ABSORCIÓN Y RELACIÓN DE VACÍOS .....	68
6.2.1	<i>Resultados absorción y relación de vacíos</i> .....	68
6.2.2	<i>Análisis absorción y relación de vacíos</i> .....	68
6.2.3	<i>Resultados densidad</i> .....	70
6.2.4	<i>Análisis densidad</i> .....	71
6.3	SORTIVIDAD.....	72
6.3.1	<i>Resultados</i> .....	72
6.3.2	<i>Análisis</i> .....	73
6.4	COEFICIENTE DE MIGRACIÓN DE CLORUROS.....	75
6.4.1	<i>Resultados</i> .....	75
6.4.2	<i>Análisis</i> .....	76
6.5	DISCUSIÓN.....	77
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>79</b>

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	---

7.1	CONCLUSIONES.....	79
7.2	RECOMENDACIONES.....	81
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>82</b>

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	---

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Ensayo de absorción por inmersión (ASTM C642).....	17
Ilustración 2 Compresión, coacción, ultrasonido, NT Build-492, módulo de elasticidad, microscopia.....	32
Ilustración 3 Procedimiento de la granulometría.....	42
Ilustración 4 Fotografías de cada uno de los agregados utilizados.....	45
Ilustración 5 Agregado #30 – Aumento 34X.....	46
Ilustración 6 Agregado #12 – Aumento 34X.....	46
Ilustración 7 Pesaje Material.....	53
Ilustración 8 Mezcla homogénea cemento, arena y metacaolín.....	54
Ilustración 9 Hidratación mezcla.....	55
Ilustración 10 Fundida de cilindros.....	55
Ilustración 11 Fraguado de muestras.....	56
Ilustración 12 Muestra para ensayo de resistencia a la compresión.....	57
Ilustración 13 Ubicación de muestra.....	59
Ilustración 14 Falla de muestra.....	59
Ilustración 15 Ecuaciones de cálculo ASTM C-642.....	60
Ilustración 16 Toma de masa.....	61
Ilustración 17 Secado de muestras en el horno.....	61
Ilustración 18 Laboratorio Sortividad.....	62
Ilustración 19 Ecuaciones de cálculo NT BUILD 492.....	63
Ilustración 20 Ensayo de Migración de Cloruros.....	63
Ilustración 21 Muestra cortada axialmente cubierta con nitrato de plata.....	64

## LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1 Curvas granulométricas 1.....	27
Grafica 2 Curva de gradación del agregado #12. ....	43
Grafica 3 Curva de gradación del agregado #30. ....	44
Grafica 4 Carga Vs Metacaolín .....	66
Grafica 5 Esfuerzo en F´c (MPa) Vs Metacaolín.....	67
Grafica 6 %Absorción Vs %Metacaolín .....	69
Grafica 7 %Vacíos Vs %Metacaolín .....	69
Grafica 8 Densidad Vs % Metacaolín .....	71
Grafica 9 Masa Vs %Tiempo Sortividad .....	74
Grafica 10 Difusión ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s) Vs %Metacaolín .....	76
Grafica 11 F´c vs Densidad .....	77
Grafica 12 F´c vs Dnssm .....	78

 <b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN	FECHA: MAY-2019  <b>VERSIÓN 0</b>
---	--	---

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación del agregado según su densidad .....	23
Tabla 2 Denominación y abertura de tamices .....	25
Tabla 3 Denominación y abertura de tamices .....	26
Tabla 4 Ensayo sobre cemento .....	30
Tabla 5 Densidad .....	30
Tabla 6 Categorías y clases de exposición .....	33
Tabla 7 Humedad natural del agregado .....	38
Tabla 8 % de absorción del agregado. ....	39
Tabla 9 Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) y peso específico (KN/m <sup>3</sup> ) del agregado .....	40
Tabla 10 Masa unitaria suelta (gr/cm <sup>3</sup> ) del agregado .....	40
Tabla 11 Masa unitaria compactada (gr/cm <sup>3</sup> ) del agregado .....	41
Tabla 12 Granulometría del agregado #12. ....	43
Tabla 13 Granulometría del agregado #30. ....	44
Tabla 14 Composición química de la arena para la fabricación de las muestras. .	47
Tabla 15 Parámetros físicos del cemento utilizado en los ensayos. ....	48
Tabla 16 Parámetros químicos del cemento utilizado en los ensayos. ....	48
Tabla 17 Composición química del cemento para la fabricación de las probetas. .	49
Tabla 18 Caracterización Química .....	49
Tabla 19 Caracterización Física .....	50
Tabla 20 Mezcla 1 - 0% Metacaolín .....	51
Tabla 21 Mezcla 2 - 10% Metacaolín .....	52
Tabla 22 Mezcla 3 - 20% Metacaolín .....	52
Tabla 23 Mezcla 4 - 30% metacaolín .....	52
Tabla 24 Resistencia a la compresión .....	65
Tabla 25 Resultados de Calculo Absorción y volumen de vacíos .....	68
Tabla 26 Resultados Cálculo de Densidad .....	70
Tabla 27 Sortividad .....	72
Tabla 28 Absorción I (mm) .....	73
Tabla 29 Datos Muestras .....	75
Tabla 30 Resultados promediados NTB 492 NORDTEST METHOD .....	76

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	---

## LISTA DE ANEXOS

1. Registro fotográfico de ensayos realizados.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	---

## RESUMEN

En el siguiente estudio se investigó el comportamiento físico mecánico y de permeabilidad a cloruros en los concretos adicionados con metacaolín, se diseñaron mezclas de concreto y se fundieron cilindros con adiciones del 0%, 10%, 20% y 30% de metacaolín. Se realiza la caracterización de las materias primas dispuestas para la elaboración de las muestras, los cuales cumplen con lo establecido en la normatividad colombiana. Las muestras son evaluadas mediante los siguientes ensayos de laboratorio: Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico (ASTM-C642), densidad, absorción y relación de vacíos de concreto, Sortividad (ASTM-C1585), medición de la tasa de absorción de agua por los concretos y Migración de ion cloruro en el concreto (NT Build-492).

Con los resultados obtenidos en estos ensayos, se identificaron los parámetros máximos y mínimos para adicionar metacaolín en mezclas de cemento hidráulico, debido a que dichas dosificaciones tienden a disminuir la resistencia a la compresión del material. De acuerdo con lo anterior, se evidencia que la adición del 10% de metacaolín mantiene una resistencia a la compresión óptima dentro de los rangos establecidos por la norma sin presentar mayores variaciones con respecto al 20% y 30% de agregado, en los cuales se puede evidenciar una modificación notable de la resistencia.

Finalmente, se pudo determinar que la adición de metacaolín genera una mejora importante en las características de durabilidad de las muestras de concreto, debido a que a mayor contenido de metacaolín se presenta una reducción en el coeficiente de difusión al ión cloruro del material evaluado.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	---

## INTRODUCCIÓN

En el presente documento se muestran los resultados del estudio del comportamiento del concreto adicionado con metacaolín. En la actualidad, el concreto es el material manufacturado más utilizado por el ser humano, así como el material que más se implementa en diferentes obras de construcción. Por lo tanto, dicho material se constituye como la principal fuente de construcción de infraestructura, así como uno de los motores del desarrollo económico de la sociedad. En ese orden de ideas, el estudio del concreto es fundamental para el desarrollo y construcción de infraestructura.

De forma general, el concreto solo soporta esfuerzos a compresión, de tal manera que los esfuerzos a tracción y tensión deben ser soportados por barras de acero que se añaden para tal fin, conocidas como acero de refuerzo. La unión de concreto simple y acero se conoce con el nombre de concreto reforzado. Sin embargo, este material (al parecer completamente sólido) es altamente poroso, razón por la cual es susceptible a sufrir ataques de agentes químicos que lo penetran. De todos los agentes que lo pueden atacar, el cloruro se convierte en la mayor amenaza para las estructuras de concreto, debido a que penetra la matriz sólida, generando de esta forma, corrosión en el acero de refuerzo.

Debido a lo anterior, en los últimos años han surgido diferentes estudios para determinar cómo se puede mitigar el daño que sufren las estructuras de concreto debido a la acción del ion cloruro. En ese marco, la presente investigación consiste en determinar cómo se afecta la penetración de cloruros en el concreto si se hacen adiciones de metacaolín a la mezcla de concreto. Para tal fin, se fabrican muestras de concreto con diferentes contenidos de metacaolín, y se implementa el ensayo de migración del ion cloruro (NT Build 492), sobre dichas muestras para caracterizar su comportamiento.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	---

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 ANTECEDENTES.

El uso del concreto es uno de los más antiguos en la construcción, aunque no hay datos exactos de su aparición, se puede discernir su uso en los años 5600 A.C en Yugoslavia, donde unían rocas con una mezcla “argamasa” compuesta de arena y cal con la cual se generaba una estructura simple. La implementación de este método también se encontró en varias construcciones en el antiguo Egipto, en estructuras tales como las pirámides: Jufu - Kafra – Menkaura (por su nombre egipcio) pero estas rocas fueron unidas con yeso calcinado impuro y arena.

En otro método en el cual se utilizaba cal viva y agua se obtenían bajas resistencias, por lo cual se realizaron más pruebas, después de muchos ensayos y errores con distintos materiales y procesos de mezcla, encontraron que las arenas de rocas volcánicas combinadas con cal y agua eran más resistentes. Esta fórmula fue utilizada para construir el teatro de Pompeya ubicado en Puzzulí, dándole a esta combinación el nombre de cemento puzolánico<sup>1</sup>.

#### 1.1.1 Concreto adicionado con metacaolín: comportamiento a carbonatación y cloruros

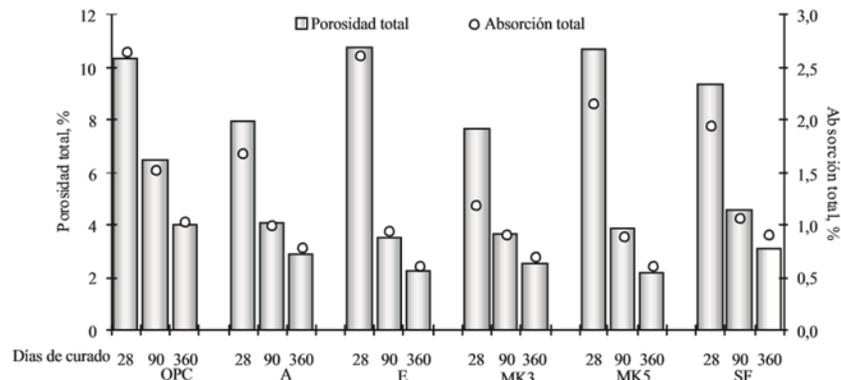
La principal causa de deterioro en estructuras de concreto es la corrosión del acero de refuerzo, generalmente iniciada por mecanismos de carbonatación y difusión de cloruros. Con la finalidad de mejorar el comportamiento del concreto ante estos ataques, en los últimos años se han implementado las adiciones minerales como alternativa para modificar las características del material.

Teniendo en cuenta lo anterior, el metacaolín se ha convertido en una alternativa para la mejora de las propiedades del concreto. De acuerdo con esto, en el año 2018, Ruby Mejía de Gutiérrez llevo a cabo una investigación para determinar el efecto de la adición de metacaolín en el concreto ante ataques de cloruros y dióxido de carbono. El ensayo de absorción de agua y porosidad total se llevó a cabo con base en la norma ASTM C642 en especímenes con 28, 90 y 360 días de curado. El grado de hidratación de cada uno de los concretos se incrementó a través de los períodos de curado prolongados y en función del tipo de adición incorporada, lo cual

<sup>1</sup> GÓMEZ, Jaime, Tecnología del Concreto, Propiedades, *Materiales y Diseño de Mezclas*, 3 ed. 2010, Bogotá D.C. ASOCRETO, 2010 Tomo 1 ISBN: 978-958-8564-03-6.

contribuyó a disminuir la absorción total y la porosidad de los concretos, comportamiento que se puede observar en la “Ilustración 1 Ensayo de absorción por inmersión (ASTM C642)”. Todos los concretos adicionados, a partir de una edad de curado de 90 días, presentaron una absorción total inferior al 1,0 % y un volumen de poros permeables inferior al 4,6 %, este valor es menor al obtenido en los concretos de referencia (OPC); se destacan entre estos los adicionados con MK2.

Ilustración 1 Ensayo de absorción por inmersión (ASTM C642)



Fuente: MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. Concreto adicionado con metacaolín.

### 1.1.2 Especificaciones materiales NSR 10.

El concreto y los materiales que se usen para la construcción tienen que estar regidos por las Normas Técnicas Colombianas (NTC) y certificadas por ICONTEC en caso de que no se cumpla con estas debe regirse a las normas de la Sociedad Americana Para Ensayos y Materiales (ASTM) Y Asociación Americana De Oficiales Estatales De Carreteras y transportes (AASHTO) las cuales están en la Norma Sismo Resistente del 2010 (NSR-10) en el título C - Concreto Estructural<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. *Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros*, Universidad del Valle, Cali valle del cauca, 2018 59p.

<sup>3</sup> Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, *reglamento colombiano de construcción sismo resistente*, NSR 10, Título C-Concreto estructural, Colombia, Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2014, 41p.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	---

### 1.1.3 Agregados

Los agregados que se pueden utilizar deben de haber pasado por ensayos para garantizar su durabilidad y resistencia, estos deben de haber cumplido las Normas Técnicas Colombianas (NTC) y la Sociedad Americana Para Ensayos (ASTM).

### 1.1.4 Planteamiento del problema

#### 1.1.4.1 Descripción del problema

Se realizaron muestras de concreto adicionando metacaolín, para poder realizar los respectivos ensayos y comprobar si es efectivo o no su uso para disminuir la penetración de los cloruros.

Se pueden presentar problemas que afecten física o mecánicamente, los cuales se deben caracterizar por su grado de daño o impacto relevante al agregar metacaolín se verificara con los ensayos respectivos que se realizaron en los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia.

Revisando los resultados que se den con el ensayo de migración de Ion cloruro en el concreto NT Build 492 lo cual optimizara el tiempo.

Analizar los resultados de las muestras que se realizaran con adición de metacaolín así se podrá verificar e identificar la optimización del uso de este producto o los posibles problemas que afecte el concreto.

#### 1.1.4.2 Formulación del problema

¿Cuál es el porcentaje de permeabilidad al ion cloruro obtenido por los concretos adicionados con metacaolín?

#### 1.1.4.3 Sistematización

- ¿Cuál es el porcentaje adecuado de metacaolín que se debe adicionar a una mezcla de concreto para mejorar su permeabilidad al ion cloruro?
- ¿Cuál es el impacto económico que acarrea el uso de metacaolín en las mezclas de concreto?
- ¿Qué lineamientos técnicos y legales se deben tener en cuenta para incluir metacaolín en los diseños de mezcla de concreto?
- ¿Qué impacto tiene la adición de metacaolín la resistencia del concreto?

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	---

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general.**

Analizar el comportamiento físico - mecánico y de permeabilidad a cloruros en el concreto hidráulico con adiciones de metacaolín.

### **1.2.2 Objetivos específicos.**

- Elaborar muestras de concreto con adición de metacaolín.
- Caracterizar físico-mecánicas las muestras elaboradas
- Realizar el ensayo de migración de ion cloruro en el concreto NT Build-492.
- Analizar resultados obtenidos en función del contenido de metacaolín.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	---

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

El comportamiento de los materiales es de sumo cuidado en la construcción, lo cual lleva a investigar y encontrar los componentes de mayor calidad, con cualidades que mejoren el producto resultante a través de la manufactura de estos. Entre los productos resultantes encontramos el concreto como uno de los más importantes en el gremio constructor por su bajo costo al momento de la fabricación, pero también existen factores a investigar, como la permeabilidad a cloruros en el concreto, la presencia del ion cloruro corroe el acero de refuerzo y a futuro genera daños por pérdida de resistencia a la flexión.

Por eso es necesario acudir a las adiciones que aumentan las características hidráulicas y puzolánicas, las cuales ayudan al concreto disminuyendo la relación de vacíos, mejorando la unión de los agregados y mitigando problemas futuros. Se conocen adiciones como las cenizas volantes, el humo sílice, la escoria de alto horno y el metacaolín entre otras, este último será objeto de investigación para el actual proyecto, en donde el objetivo principal es evaluar la mitigación de la permeabilidad de los cloruros en concretos adicionados con metacaolín.

Se medirá el rendimiento de la adición de metacaolín como un material cementante, será adicionado a la mezcla de concreto con el fin de disminuir los vacíos y mitigar la permeabilidad de los cloruros, los cuales afectan el acero por efectos de corrosión. Se busca disminuir la porosidad normal del concreto manteniendo una buena trabajabilidad, resistencia y módulo de elasticidad.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	---

## 1.4 DELIMITACIÓN

### 1.4.1 Espacio

- Salas de computación de la Universidad Católica de Colombia.
- Laboratorios y equipos de la Universidad Católica de Colombia.

### 1.4.2 Tiempo

El desarrollo del proyecto se llevará a cabo del 28 de enero del 2019 al 29 de abril del 2019.

### 1.4.3 Contenido

- **Informe de trabajo de Grado:** Comportamiento físico - mecánico y de permeabilidad a cloruros en el concreto hidráulico con adiciones de metacaolín.
- **Artículo:** Comportamiento físico - mecánico y de permeabilidad a cloruros en el concreto hidráulico con adiciones de metacaolín.

### 1.4.4 Alcance

- Se calificará el tipo de concreto sin refuerzo, el estudio no va dirigido a la afectación de los refuerzos al contacto con los cloruros.
- Con los resultados obtenidos se dará apoyo a la investigación de migración del ion cloruro en conjunto a otras líneas de investigación para permeabilidad del concreto según distintos aditivos.
- El desarrollo de las muestras y toma de ensayos será llevado a cabo en el primer semestre del año 2019-1.
- Los materiales de trabajo serán los disponibles en la Universidad Católica de Colombia, bajo el presupuesto dispuesto para la investigación del ING. Héctor Camilo Higuera Flórez.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	---

## 1.5 MARCO REFERENCIAL

A continuación, se muestran el marco teórico, de referencia y legal sobre los cuales se va a desarrollar el anteproyecto.

### 1.5.1 Marco teórico

#### 1.5.1.1 Estructuras

- ***Propiedades Físico-mecánicas***

En el diseño de estructuras de concreto reforzado, se encuentran distintos tipos de modelado y control de esfuerzos a los que están sometidos los elementos que componen las macroestructuras que se observan a diario en el entorno. Dichas estructuras cuentan con análisis de esfuerzos, control de los materiales, control del refuerzo, y en el sistema de instalación para todos los componentes del concreto reforzado. Como punto de análisis inicial están los esfuerzos a cortante, momento, flexión, compresión, deformación, el tipo de cargas que pueden ser perpendiculares al elemento o axial a su eje longitudinal, cargas externas, cargas propias y eventos sísmicos. Con el análisis en todos estos campos se diseñan las estructuras para ofrecer comodidad, seguridad a los usuarios y en menor grado proteger el patrimonio.

Como efecto de estudio se trabajó la compresión y la elasticidad de los concretos propuestos para cumplir con el estudio. Para la compresión se usó la norma “*INV-E-323-13 Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico*”.

- ***Propiedades Durabilidad-química***

Como hecho importante la durabilidad de las estructuras es un punto crucial para el desarrollo de los proyectos de ingeniería, por lo cual se debe contemplar y estimar a través del tiempo, de qué forma se verán afectados los elementos en contacto con el medio ambiente y los componentes existentes durante su uso. Según lo anterior se debe diseñar para que la estructura resista ciertos cambios en el ambiente y componentes imperceptibles, por lo cual se trabajara la penetración de los cloruros presentes en el medio ambiente y el comportamiento del concreto con adición de metacaolín en contacto con los cloruros.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	---

### 1.5.1.2 Agregados

Para el concreto estructural, los agregados se encuentran en un 75% de del volumen final después de fraguado, el agregado que debe acomodarse de forma óptima ya sea por métodos de vibrado o la fluidez con que se diseña el concreto, este agregado con resistencia óptima “composición química” ofrece resistencia y durabilidad que aumentan la dureza y resistencia del concreto, por dichos motivos es necesario estudiar los agregados con el fin de crear un concreto denso, sin vacíos, para la reacción más favorable con el cemento. Para este trabajo se necesita verificar los agregados finos y gruesos que serán adicionados a las mezclas diseñadas.

- **Clasificación de los Agregados**

En general los agregados para concreto se han clasificado de varias maneras a través del tiempo, pero principalmente desde el punto de vista de su tamaño, procedencia y densidad.

- **Densidad**

Con el control de la densidad de agregados finos y gruesos presentes en un Volumen de concreto, se establece la mínima y máxima presencia de elementos según su tamaño para obtener la rigidez y durabilidad deseada del concreto. Para este control se utilizarán los ensayos “NTC-237-14 MÉTODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO” y “INV-223-13 DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECIFICA) Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO”.

Otra forma de clasificar los agregados es según su densidad, la cual depende de la cantidad de masa por unidad de volumen y del volumen de los poros, ya se trate de agregados naturales o artificiales. Esta distinción se hace porque afecta la densidad del concreto (ligero, normal o pesado) que se desea producir, esto lo indica la tabla 1 a continuación:

Tabla 1 Clasificación del agregado según su densidad

 <b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN	FECHA: MAY-2019  <b>VERSIÓN 0</b>
---	--	---

Tipo de concreto	Peso unitario del concreto Kg/m <sup>3</sup>	Peso unitario del agregado Kg/m <sup>3</sup>	Ejemplo de utilización	Ejemplo de agregado
Ligero	500 – 800 950 – 1,350 1,450- 1,950	480 – 1,040	Concreto para aislamiento, concretos para rellenos y mampostería no estructural Concreto estructural	Piedra pómez Perlita Canto rodado
Normal	2,250 – 2,450	1,300 – 1,600	Concreto estructural y no estructural	Agregado de río
Pesado	3,000 – 5,600	3,400 – 7,500	Concreto para protección contra radiación gamma o X, y contrapesas	Piedra barita, magnetita

Fuente: Introducción al Concreto, Escuela de Ingenieros Militares.

- **Granulometría**

Se desea verificar la distribución del agregado fino y grueso existente en un volumen de concreto con una mezcla específica por medio de tamizado, “NTC-174 ESPECIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO”.

La forma más generalizada de clasificar los agregados es según su tamaño, el cual varía desde fracciones de milímetros hasta varios centímetros en sección transversal. Esta distribución del tamaño de las partículas es lo que se conoce con el nombre de granulometría.

 <b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN	FECHA: MAY-2019  <b>VERSIÓN 0</b>
---	--	---

Tabla 2 Denominación y abertura de tamices

Denominación del tamiz	Designación ISO	Designación ICONTEC		Antigua designación ASTM
		Normal	Alterno	
150 mm				6"
125 mm				5"
106 mm		107,6 mm	4.24"	4.24"
		101,6 mm	4"	
90 mm		90,5 mm	3-1/2"	3-1/2"
75 mm		76,1 mm	3"	3"
63 mm		64 mm	2-1/2"	2-1/2"
53 mm		53,8 mm	2"	2.12"
		50,8 mm	1-3/4"	2"
45 mm		45,3 mm	1-1/2"	1-3/4"
37,5 mm		38,1 mm	1-1/4"	1-1/2"
31,5 mm		32 mm	1.06"	1"
26,5 mm		26,9 mm	1"	1,06"
		25,4 mm	7/8"	1"
22,4 mm	22.4 mm	22,6 mm	3/4"	7/8"
19 mm		19 mm	6/8"	3/4"
16 mm	160 mm	16 mm	0.53"	5/8"
13,2 mm		13,5 mm	1/2"	0,53"
		12,7 mm	7/16"	
11,2 mm	11,2 mm	11,2 mm	3/8"	7/16"
9,5 mm		9,51 mm	5/16"	3/8"
8 mm	8 mm	8 mm	0,285"	5/16"
6,7 mm		6,73 mm	1/4"	0,285"

Fuente: Introducción al Concreto, Escuela de Ingenieros Militares.

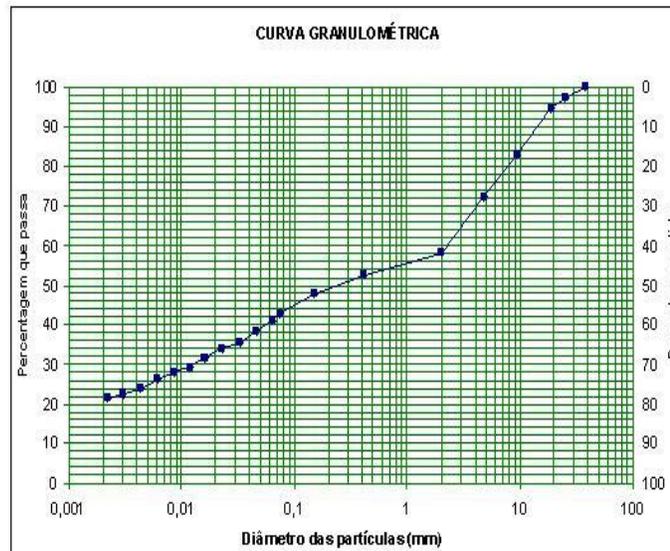
 <b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN	FECHA: MAY-2019  <b>VERSIÓN 0</b>
---	--	---

Tabla 3 Denominación y abertura de tamices

Denominación del tamiz	Designación ISO	Designación ICONTEC		Antigua designación ASTM
		6,35 mm	N° 3-1/2	
5,6 mm	5,6 mm	5,66 mm	N° 4	N° 3-1/2
4,75 mm		4,76 mm	N° 5	N° 4
4 mm	4 mm	4 mm	N° 6	N° 5
3,35 mm		3,36 mm	N° 7	N° 6
2,8 mm		2,83 mm	N° 8	N° 7
2,36 mm		2,38 mm	N° 10	N° 8
2 mm	2 mm	2 mm	N° 12	N° 10
1,7 mm		1,68 mm	N° 14	N° 12
1,4 mm	1,4 mm	1,41 mm	N° 16	N° 14
1,18 mm		1,19 mm	N° 18	N° 16
1 mm	1 mm	1 mm	N° 20	N° 18
850 µm		841 mm	N° 25	N° 20
710 µm	710 µm	707 mm	N° 30	N° 25
600 µm		595 mm	N° 35	N° 30
500 µm	500 µm	500 µm	N° 40	N° 35
425 µm		420 µm	N° 45	N° 40
355 µm	355 µm	354 µm	N° 50	N° 45
300 µm		297 µm	N° 60	N° 50
250 µm	250 µm	250 µm	N° 70	N° 60
212 µm		210 µm	N° 80	N° 70
180 µm	180 µm	177 µm	N° 100	N° 80
150 µm		149 µm	N° 120	N° 100
125 µm	125 µm	125 µm	N° 140	N° 120
106 µm		105 µm	N° 170	N° 140
90 µm	90 µm	88 µm	N° 200	N° 170
75 µm		74 µm	N° 230	N° 200
63 µm	63 µm	63 µm	N° 270	N° 230
53 µm		53 µm	N° 325	N° 270
45 µm	45 µm	44 µm	N° 400	N° 325
38 µm		37 µm		N° 400

Fuente: Introducción al Concreto, Escuela de Ingenieros Militares.

Grafica 1 Curvas granulométricas 1



Fuente: Ejemplo de Curva Granulométrica generada en Excel, 20 de febrero 2008, Carlos Rogerio Santana

- **Humedad**

Determinar el contenido de agua en los agregados para incluirlo con el contenido de agua general de una muestra de concreto, este contenido de agua está combinado químicamente con el agregado y se elimina exponiendo la muestra a altas temperaturas. Estos resultados se determinan mediante el ensayo "NTC-1776 MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR POR SECADO EL CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS" Y "I.N.V. E- 216 CONTENIDO TOTAL DE AGUA EVAPORABLE DE LOS AGREGADOS POR SECADO".

- **Abrasión**

Según los tamaños de las muestras se estudia su comportamiento ante la degradación de los agregados por fricción y abrasión con otros elementos de igual o mayor dureza que la propia, este ensayo se efectúa por medio de la máquina de los ángeles, para efectos de resistencia del material. Los resultados son determinados por el ensayo "NTC 98 MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE AGREGADOS GRUESOS HASTA DE 37,5

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	---

mm, UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES”, “I.N.V. E- 218 RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37.5 mm (1 ½”) POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ANGELES” y “I.N.V. E- 219 RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37.5 MAYORES DE 19 mm (1 ¾”) POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ANGELES” .

### 1.5.1.3 Agua

El agua es el componente del concreto en virtud de cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan propiedades de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados.

El agua de la mezcla interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad debe ser la estrictamente necesaria, pues la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evaporará y creará huecos en el hormigón disminuyendo su resistencia. Puede estimarse que cada litro de agua de exceso supone anular dos kilos de cemento en la mezcla. Sin embargo, una reducción excesiva de agua originaría una mezcla seca, poco manejable y muy difícil de colocar en obra. Por ello es muy importante fijar adecuadamente la cantidad de agua.

- **Agua de Curado**

El curado puede definirse como el conjunto de condiciones necesarias para que la hidratación de la pasta evolucione sin interrupción, hasta que todo el cemento se hidrate y el concreto alcance sus propiedades potenciales. Por lo tanto, el agua de curado constituye el suministro adicional de agua para hidratar eficientemente el cemento.

El agua de los morteros debe estar limpia, sin impurezas ni productos nocivos para los aglomerantes (agua potable). El agua de mar, el agua muy dura y la que contiene materias químicas u orgánicas debe excluirse de la preparación de hormigones. La cantidad de agua que hay que incorporar a la mezcla depende de la humedad natural contenida en los agregados.

 <b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN	FECHA: MAY-2019  <b>VERSIÓN 0</b>
---	--	---

#### 1.5.1.4 Cemento

Un material cementante es aquel que tiene las propiedades de adhesión y cohesión necesarias para unir agregados inertes y conformar una masa sólida de resistencia y durabilidad adecuadas. Esta categoría tecnológicamente importante de materiales incluye no sólo el cemento sino también limos, asfaltos y alquitranes, tal como se usan en la construcción de carreteras y otros. Para la fabricación del concreto estructural se utilizan exclusivamente los llamados cementos hidráulicos. Para completar el proceso químico (hidratación) mediante el cual el polvo de cemento fragua y endurece para convertirse en una masa sólida se requiere la adición de agua. El cemento Portland es el más común de todos.

El cemento es un producto obtenido al pulverizar el Clinker que resulta de la calcificación hasta una función incipiente de una mezcla debidamente dosificada de material calcáreo y arcilloso, con adición de yeso. Este cemento tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua ya que con ella experimenta hidratación. Por lo cual también se denomina cemento hidráulico.

- **Tipos de Cemento**

- Tipo UG: Cemento hidráulico para construcción general.
- Tipo ART: Alta Resistencia Temprana.
- Tipo MRS: Moderada Resistencia a los Sulfatos.
- Tipo ARS: Alta Resistencia a los Sulfatos.
- Tipo MCH: Moderado Calor de Hidratación.
- Tipo BCH: Bajo Calor de Hidratación<sup>4</sup>.

- **Finura**

En la caracterización del cemento, se cuenta con un ensayo “NTC 33 MÉTODO PARA DETERMINAR LA FINURA DEL CEMENTO HIDRÁULICO POR MEDIO DEL APARATO BLAINE DE PERMEABILIDAD AL AIRE” en este ensayo se determina

---

<sup>4</sup> Norma Técnica Colombiana, *Especificación de desempeño para cemento hidráulico*, NTC 121, 18-06-2014, Bogotá D.C., 2018, 10p.

 <b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN	FECHA: MAY-2019  <b>VERSIÓN 0</b>
---	--	---

la capacidad de recubrimiento en una superficie específica para determinar el área sobre gramo de cemento.

Tabla 4 Ensayo sobre cemento

TEMA	Norma	Antecedente	Normas que deben
Finura: Aparato de Blaine	33	C204	121
Finura: Tamices NTC 44	294	C430	32
Finura: Tamices NTC 75 y	226	C184	32,184
Finura: Turbidímetro.	597	C597	32, 294.

Fuente: Introducción al Concreto, Escuela de Ingenieros Militares.

- **Densidad**

Se utiliza el método de ensayo “NTC-221 MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO”. Tomando como base que si la cantidad de cemento es mayor en relaciona a sus agregados, puede desencadenar una exudación mayor y un mal fraguado, por el contrario, si la cantidad de cemento en la mezcla es menor, la cohesión de los materiales puede ser baja y desembocando e3n un posible descascara miento y perdida de agregados.

Tabla 5 Densidad

TEMA	Norma NTC	Antecedente ASTM
Densidad	221	C188

Fuente: Introducción al Concreto, Escuela de Ingenieros Militares.

- **Fraguado**

Con el control óptimo del fraguado, se controla la pérdida de agua por exudación y el tiempo que se debe mantener un curado idóneo según la temperatura del sitio, hay 2 ensayos utilizados normalmente “NTC 118 MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRÁULICO MEDIANTE AGUJA DE VICAT”.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	---

### 1.5.1.5 Concreto

- **Asentamiento de la Mezcla**

Control de asentamiento de la mezcla de concreto de cemento hidráulico para obra y en laboratorio. Estos resultados se obtienen del ensayo “NTC 396 MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DEL CONCRETO (SLUMP)”.

- **Permeabilidad a los Cloruros “NT BUILD 492”**

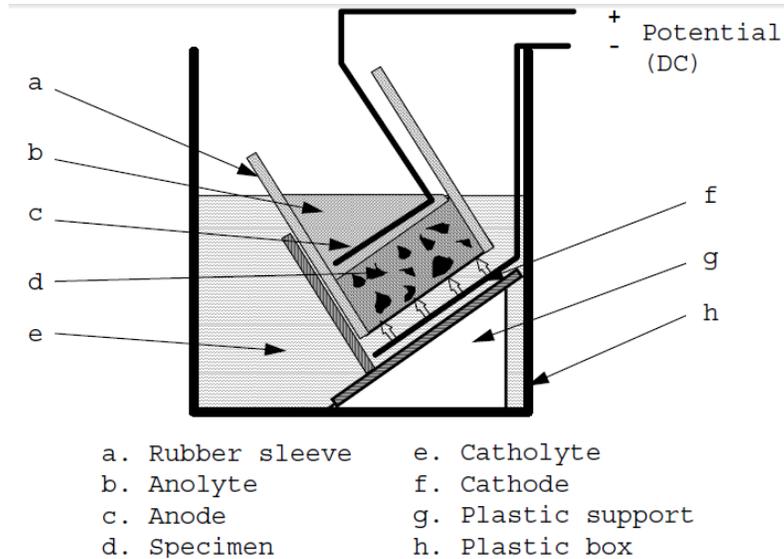
El método es aplicable a especímenes endurecidos hechos en laboratorio o perforados a partir de estructuras de campo. La migración de cloro coeficiente determinado por el método es una medida de la resistencia del material probado a la penetración de cloruro. El coeficiente de migración de estado no estable, no se puede comparar directamente con coeficientes de difusión de cloruro obtenidos de los otros métodos de prueba, como la inmersión en estado no estable o la prueba de migración en estado estable. El método requiere muestras cilíndricas con un diámetro de 100 mm y un espesor de 50 mm, en rodajas de cilindros de fundición o núcleos perforados con una longitud mínima de 100 mm.

Un potencial eléctrico externo se aplica axialmente a través del espécimen y fuerza a los iones cloruro afuera a migrar hacia el espécimen. Después de una determinada duración de la prueba, el espécimen es dividido axialmente y una solución de nitrato de plata se pulveriza en una de las secciones recién divididas. La profundidad de penetración del cloruro puede medirse a partir del cloruro de plata blanco visible, después de lo cual el coeficiente de migración del cloruro se calcula a partir de esta profundidad de penetración<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> NORDTEST METHOD, *Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*, NT BUILD-492, ED. 1999-11, 2018, 1-6p.

Ilustración 2 Compresión, coacción, ultrasonido, NT Build-492, módulo de elasticidad, microscopia



Fuente: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, NT BUILD-492.

### 1.5.1.6 Diseño de Mezclas

El tipo de mezcla generada según la dosificación de materiales en ella permite mayor o menor, manejabilidad, tiempo de curado y costos, por lo tanto, es preciso el uso de mezclas adecuadamente diseñadas para encontrar un estado óptimo de la relación entre la pasta de cemento y los agregados, logrando disminuir la relación de vacíos en el concreto.

## 1.5.2 Marco conceptual

### 1.5.2.1 Metacaolín

El metacaolín es un material Sillico-aluminoso activado que se obtiene mediante la calcinación a 650-800 °C de una arcilla llamada caolín (4). El MK de alta reactividad, un mineral puzolánico sintético, reacciona de forma muy vigorosa con el hidróxido cálcico, lo que mejora de forma significativa las prestaciones del hormigón. Esta sustancia ha demostrado ser una alternativa adecuada al humo de sílice en la formulación de hormigones de alta resistencia o de altas prestaciones. De hecho, Justica y otros (8) observaron que el MK de alta reactividad producía resultados mejores incluso que el humo de sílice y mejoraba las propiedades del hormigón a la

vez que garantizaba una buena trabajabilidad. Con una relación agua-conglomerante de entre 0,36 y 0,38, el hormigón con MK precisa desde un 25 hasta un 35% menos de aditivo supe plastificante que el material que lleva HS para lograr un escurrimiento en el cono de entre 120 y 180 mm. El primero tiene una textura más suave y fragua algo más rápidamente, además de producir menos exudación y permitir un mejor acabado que el hormigón con HS<sup>6</sup>.

### 1.5.2.2 Cloruro

Son contaminantes fuertes y agresivos porque al combinarse con el agua de lluvia provocan la formación de ácido clorhídrico o ácido hipocloroso. En concreto, el primero se puede llegar a combinar con la cal de hidrólisis de los cementos, produciendo cloruro cálcico y rebajando el pH del material. Entonces, el material sufre una fuerte presión de cristalización que disgrega su superficie.

Tabla 6 Categorías y clases de exposición

<b>C</b> Protección del refuerzo para la corrosión	No aplicable	<b>C0</b>	Concreto seco o protegido contra la humedad
	Moderada	<b>C1</b>	Concreto expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros
	Severa	<b>C2</b>	Concreto expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen

Fuente: Introducción al Concreto, Escuela de Ingenieros Militares.

### 1.5.2.3 Penetración De Cloruros

Los iones de cloruro penetran a través del concreto al refuerzo acero inicialmente por acción capilar, especialmente si el hormigón es seco, y luego por otros mecanismos, el más significativo es la difusión. La tasa de penetración está determinada en gran medida por la estructura de poros de la matriz del concreto, que puede modificarse significativamente mediante el uso de SCM. El concreto con

---

<sup>6</sup> Rafik Abbas, Salah A. Abo-El-Enein, El-Sayed Ezza, Propiedades y durabilidad del cemento con adición de metacaolín: mortero y hormigón, Egipto, 17-diciembre 2010, 1p.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	---

baja permeabilidad es más resistente a la corrosión relacionando daños y otros mecanismos de deterioro que requieren la entrada de agua o agentes agresivos en el agua en el concreto como ASR, ataque de sulfato congelación y descongelación. Mientras que la permeabilidad al agua, que influye directamente en estos mecanismos de deterioro. Se pueden medir probando la penetración del cloruro, es la prueba más común para la corrosión.<sup>7</sup>

#### 1.5.2.4 Corrosión

El concreto protege el acero incrustado de la corrosión, a través de su naturaleza altamente alcalina. El entorno de pH alto en el concreto (usualmente mayor que 13.0) causa un daño pasivo y se forma una película de óxido protector no corrosivo alrededor del acero. Sin embargo, la presencia de iones cloruro del aire o el agua de mar puede destruir o penetrar esta película que conduciendo a la corrosión. La corrosión del acero es un proceso expansivo: el subproducto de la corrosión, el óxido, induce unas significativas tensiones y eventual desprendimiento del hormigón sobre el refuerzo de acero<sup>8</sup>.

#### 1.5.2.5 Agrietamiento

El agrietamiento del concreto es un proceso aleatorio, altamente variable e influido por muchos factores. A causa de la complejidad del problema, los métodos disponibles para predecir el ancho de las grietas se fundamentan principalmente en la observación de ensayos. La mayor parte de las ecuaciones que se han desarrollado estiman el ancho máximo probable de la grieta, lo cual significa comúnmente que casi el 90 por ciento de los anchos de grietas en el elemento van

---

<sup>7</sup> NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, *Guidelines for Concrete Mixtures Containing Supplementary Cementitious Materials to Enhance Durability of Bridge Decks*, Primera edición, 2007, WASHIGTON D.C., 21p.

<sup>8</sup> KOSMATKA, Steven H, Michelle L.Wilson, *Design and Control of Concrete Mixtures-PCA, Bridges, Other Structures, and Hydraulics and Hydrology • Materials and Construction*, Quinceava edición, Washigton D.C. 2011, 16 de Septiembre del 2018, 215p.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	---

a estar por debajo del valor calculado. Sin embargo, algunas veces pueden ocurrir grietas aisladas con ancho superior al doble del calculado<sup>9</sup>.

### 1.5.3 Marco legal

- Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10
- Título-C NSR-10 en el que se encuentra los temas tratados en el Capítulo C.3 para la investigación.
- Norma técnica colombiana NTC 1486 Encargada de la documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación.
- Norma técnica colombiana NTC 4490 Referencias documentales para fuentes de información electrónicas.
- Norma técnica colombiana NTC 5613 Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura
- NTC-237-14 Método Para Determinar la Densidad y la Absorción del Agregado Fino
- NTC 673 Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto
- NTC 4025 Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de poisson en concreto a compresión
- NTC-174 Especificación de los agregados para concreto
- NTC-1776 Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados
- I.N.V. E- 216 Contenido total de agua evaporable de los agregados por secado
- I.N.V. E- 219 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mayores de 19 mm (1 3/4") por medio de la máquina de los ángeles
- NTC 33 Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire
- NTC-221 Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico
- NTC 118 Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante aguja de vicat

---

<sup>9</sup> NILSON, Arthur H, *Diseño de Estructuras de Concreto*, McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A., Duodécima edición, Bogotá D.C., 2001, 16 de septiembre del 2018, 211p.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	---

- NTC 396 Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto (SLUMP)
- NT BUILD 492 Permeabilidad a los Cloruros
- INV-E-323-13 Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico
- NTC 220 cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado
- ASTM-C642 Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”
- ASTM C1585 measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAY-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	---

## 1.6 METODOLOGÍA

- Investigación de los antecedentes referentes a la problemática investigada.
- Diseño de mezclas, según porcentajes variables de los componentes.
- Fabricación de probetas según diseño.
- Ejecución de ensayos mecánicos y físicos sobre las probetas elaboradas y su caracterización.
- Ejecución del ensayo “NT BUILD 492” sobre las muestras fabricadas para determinar su comportamiento a penetración de cloruros.
- Análisis de los resultados.

### 1.6.1 Tipo de Estudio

Trabajo de investigación.

## 2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

### 2.1 AGREGADO

#### 2.1.1 Humedad Natural

La humedad natural es la cantidad de agua que tiene un agregado a temperatura ambiente. Es un procedimiento sencillo y consiste en pesar una cantidad mayor a 200 gr de agregado en su estado natural, posteriormente se coloca en el horno a una temperatura de  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 horas. Después de transcurrido dicho tiempo, se vuelve a pesar, por lo cual la humedad natural ( $w$ ) se halla mediante la siguiente expresión:

$$w(\%) = \frac{W_n - W_s}{W_n}$$

Donde:

$W_n$ : Peso natural de la muestra

$W_s$ : Peso seco de la muestra

Para los agregados utilizados en el presente trabajo se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 7 Humedad natural del agregado

<i>Material</i>	<i>W natural (gr)</i>	<i>W seco (gr)</i>	<i>W (%)</i>
#12	500	499.8	0.04
#30	500	499.6	0.08

Fuente: Elaboración propia

#### 2.1.2 Absorción

La absorción indica el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresado como un porcentaje de la masa seca. Para hallar este valor, se deja saturar la muestra durante 24 horas, y después se pesa una muestra no menor a 200 gr seca superficialmente. Esta muestra se lleva al horno a una temperatura de  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 horas y posteriormente se pesa la muestra seca.

 <b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN	<b>FECHA: MAYO-2019</b>  <b>VERSIÓN 0</b>
---	--	---

Tabla 8 % de absorción del agregado.

<i>Material</i>	<i>W húmedo (gr)</i>	<i>W seco (gr)</i>	<i>Absorción (%)</i>
<b>#12</b>	<b>500</b>	<b>486.3</b>	<b>2.74</b>
<b>#30</b>	<b>500</b>	<b>485.7</b>	<b>2.86</b>

Fuente: Elaboración propia

### 2.1.3 Densidad

La densidad es una propiedad ( $\delta$ ) física de los agregados y está definida por la relación entre la masa y el volumen de un agregado determinado, lo que significa que depende directamente de las características del grano de agregado. Para este ensayo se siguen las recomendaciones hechas en la NTC327. Este ensayo consiste en tomar una muestra de más de 200 gr de agregado y depositarlo en una probeta con agua para determinar cuál es el volumen que ocupa dicho material. Posteriormente se seca esta muestra en el horno, y se pesa. La densidad se halla mediante la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{W_s}{V}$$

Donde:

$W_s$  = Peso de la muestra seca

$V$  = Volumen que ocupa la muestra.

Por otro lado, el peso específico ( $\gamma$ ) es la relación entre el peso de una muestra de agregado y su volumen, por lo que se halla mediante la expresión:

$$\gamma = \delta * g$$

Donde:

$\delta$  = Densidad de la muestra.

$g$  = Gravedad (Asumida como 9.81 m/s<sup>2</sup>)

De este modo, las densidades y pesos específicos que tienen los agregados usados en la presente tesis son:

 <b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN	<b>FECHA: MAYO-2019</b>  <b>VERSIÓN 0</b>
---	--	---

Tabla 9 Densidad (gr/cm<sup>3</sup>) y peso específico (KN/m<sup>3</sup>) del agregado.

<i>Material</i>	<i>W muestra (gr)</i>	<i>V total (ml)</i>	<i>V muestra (ml)</i>	<i>δ (gr/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>γ (KN/m<sup>3</sup>)</i>
#12	499.80	440	190	2.63	26.31
#30	420.80	410	160	2.63	26.30

Fuente: Elaboración propia

#### 2.1.4 Masa unitaria suelta

La masa unitaria es la relación entre la masa de un agregado y el volumen que ocupa, y se diferencia de la densidad en que para hallar la masa unitaria se tiene en cuenta el volumen de vacíos.

Para hallar la masa unitaria suelta se utilizan los procedimientos descritos en la NTC-092. El procedimiento consiste en llenar el molde de 2500 ml con el agregado hasta el borde y nivelar. Posteriormente se pesa, y la masa unitaria se calcula mediante la expresión:

$$M = \frac{W_{mm} - W_m}{V}$$

Donde:

$W_{mm}$  = Peso del material y el molde

$W_m$  = Peso del molde.

$V$  = Volumen del molde, en este caso 2500 ml o 2500 cm<sup>3</sup>.

Los valores de masa unitaria suelta encontrados en este material fueron:

Tabla 10 Masa unitaria suelta (gr/cm<sup>3</sup>) del agregado.

<i>Material</i>	<i>W mat + molde (gr)</i>	<i>W molde (gr)</i>	<i>V molde (ml)</i>	<i>Mus (gr/cm<sup>3</sup>)</i>
#12	6854	2715	2500	1.66
#30	6826	2715	2500	1.64

Fuente: Elaboración propia

### 2.1.5 Masa unitaria compactada

La masa unitaria se halla de forma similar a la masa unitaria suelta. La diferencia radica en que, para hallar la masa unitaria compactada, se divide el llenado del molde en tres etapas. Primero se llena hasta la tercera parte con agregado y se apisona 25 veces con una varilla. Se hace lo mismo con las otras dos capas hasta llenar el molde hasta el borde. Posteriormente se pesa todo y la masa unitaria compactada se halla de forma análoga al anterior ensayo, mediante la expresión:

$$M = \frac{W_{mm} - W_m}{V}$$

Donde:

$W_{mm}$  = Peso del material y el molde

$W_m$  = Peso del molde.

$V$  = Volumen del molde, en este caso 2500 ml o 2500 cm<sup>3</sup>.

Los valores de masa unitaria compactada encontrados en este material fueron:

Tabla 11 Masa unitaria compactada (gr/cm<sup>3</sup>) del agregado.

<i>Material</i>	<i>W mat + molde (gr)</i>	<i>W molde (gr)</i>	<i>V molde (ml)</i>	<i>Muc (gr/cm<sup>3</sup>)</i>
#12	7154	2715	2500	1.78
#30	7198	2715	2500	1.79

Fuente: Elaboración propia

### 2.1.6 Granulometrías del agregado

El análisis granulométrico del agregado tiene por objeto determinar las cantidades en que están presentes partículas de ciertos tamaños en el material. La prueba consiste en hacer pasar la muestra a través de diferentes mallas y determinar el porcentaje de material que se retiene en cada una.

En la norma de la ASTM C 33 se estipulan todos los requerimientos que se deben tener en cuenta para hacer una granulometría. Para este trabajo se utilizaron dos tipos de combinaciones de mallas, las cuales fueron:

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

- Mallas: 4, 10, 12, 16, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 y 200.

La disposición de las mallas y el equipo utilizado para hacer cada una de las granulometrías se muestra a continuación:

Ilustración 3 Procedimiento de la granulometría



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la granulometría de cada uno de los agregados utilizados.

- **Agregado #12**

La granulometría obtenida para el agregado #12, se muestra a continuación:

Tabla 12 Granulometría del agregado #12.

TAMIZ	PESO RETEN.(G)	% QUE PASA	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO
4	0	100	0	0
10	0.6	99.4	0.6	0.6
12	12.6	86.8	12.6	13.2
16	71.5	15.4	71.4	84.6
20	14.1	1.3	14.1	98.7
30	1.3	0	1.3	100
40	0	0	0	100
50	0	0	0	100
60	0	0	0	100
80	0	0	0	100
100	0	0	0	100
200	0	0	0	100
FONDO	0	0	0	
TOTAL	100.1			

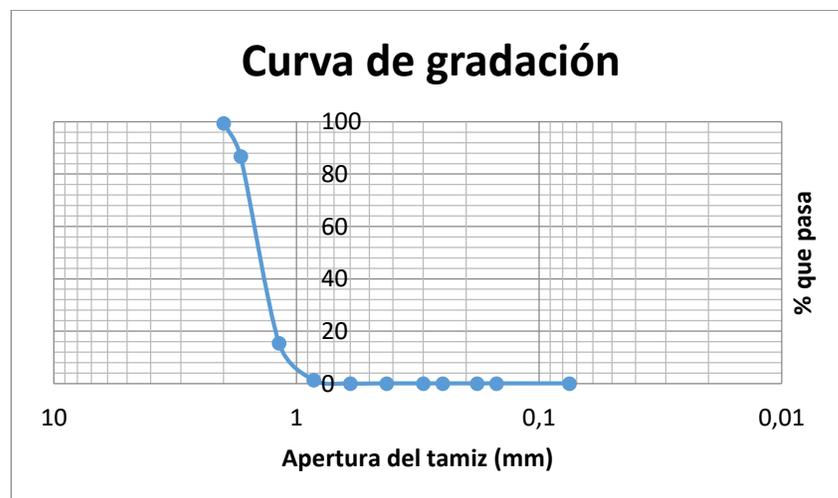
  

Grava (%)	13.20
Arena (%)	86.80
Finos (%)	0.00
Clasifica	SP
Coef. Curvatura Cc	1.05
Coef. Uniformidad Cu	1.43
Diámetro Efectivo D10	1.05
Módulo de finura	8.97

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos se logra graficar la siguiente curva de gradación para el agregado:

Grafica 2 Curva de gradación del agregado #12.



Fuente: Elaboración propia

- **Agregado #30**

La granulometría obtenida para el agregado #30, se muestra a continuación:

Tabla 13 Granulometría del agregado #30.

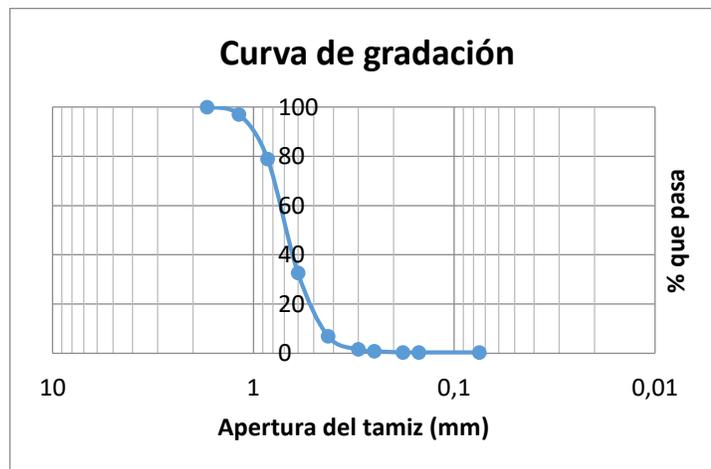
TAMIZ	PESO RETEN.(G)	% QUE PASA	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO
0	0	100	0	0
10	0	100	0	0
12	0	100	0	0
16	2.9	97.1	2.9	2.9
20	18.1	79	18.1	21
30	46.2	32.7	46.3	67.3
40	25.6	7	25.7	93
50	5.4	1.6	5.4	98.4
60	0.7	0.9	0.7	99.1
80	0.5	0.4	0.5	99.6
100	0	0.4	0	99.6
200	0	0.4	0	99.6
FONDO	0.4	0	0.4	
TOTAL	99.8			

Grava (%)	0.00
Arena (%)	99.60
Finos (%)	0.40
Clasifica	SP
Coef. Curvatura CC	1.02
Coef. Uniformidad Cu	1.67
Diámetro Efectivo D10	0.45
Módulo de finura	6.81

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos se logra graficar la siguiente curva de gradación para el agregado:

Grafica 3 Curva de gradación del agregado #30.



Fuente: Elaboración propia

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	--

### 2.1.7 Fotografías del agregado

A continuación, se muestran fotografías década uno de los agregados utilizados, para diferenciarlos bien uno del otro:

Ilustración 4 Fotografías de cada uno de los agregados utilizados.

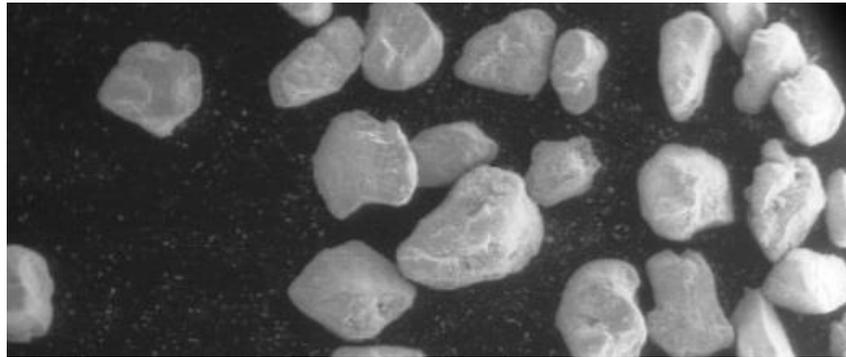


Fuente: Elaboración propia

### 2.1.8 Fotografías microscópicas del agregado

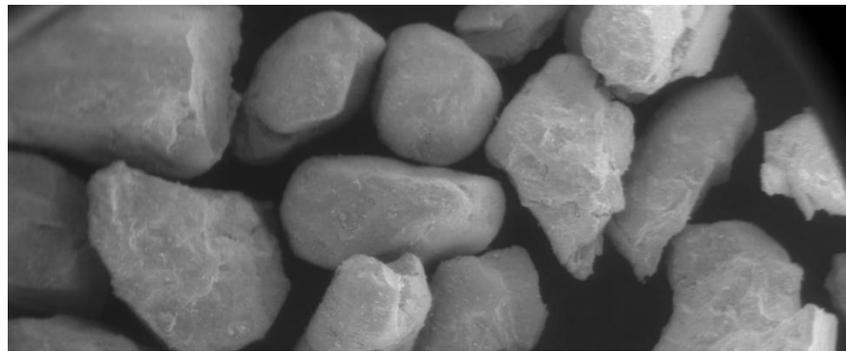
A continuación, se muestran fotografías de todos los agregados, tomadas con un microscopio:

Ilustración 5 Agregado #30 – Aumento 34X



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 6 Agregado #12 – Aumento 34X



Fuente: Elaboración propia

### 2.1.9 Prueba de fluorescencia de rayos X

Para conocer la composición química del agregado, se hizo un ensayo de fluorescencia de rayos X sobre una muestra de agregado. Por medio de esta prueba se pueden reconocer casi la totalidad de los elementos y compuestos químicos que conforman un material.

Los ensayos fueron realizados en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia y fueron financiados con el presupuesto del proyecto a cargo del ingeniero Héctor Camilo Higuera Flores, Docente de la Universidad Católica de Colombia.

Tabla 14 Composición química de la arena para la fabricación de las muestras.

<i>Elemento y/o compuesto</i>	<i>% en peso</i>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	97.821
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.981
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.693
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.169
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.097
<b>MgO</b>	0.095
<b>CaO</b>	0.064
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.027
<b>Cr</b>	0.018
<b>Zr</b>	0.013
<b>MnO</b>	0.011
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0.005
<b>Sr</b>	0.004
<b>Zn</b>	0.002

Fuente: Elaboración propia

## 2.2 CEMENTO

Como se había indicado anteriormente el cemento utilizado para la fabricación de las muestras fue cemento Samper Tipo I. La caracterización de este material fue más sencilla que la de los agregados, debido a que proviene de un proceso estandarizado.

### 2.2.1 Parámetros físicos y químicos del cemento

De acuerdo con esto, los parámetros físicos del cemento para elaborar las muestras de concreto son:

Tabla 15 Parámetros físicos del cemento utilizado en los ensayos.

Parámetros	
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	2.95
Fraguado inicial mínimo (min)	90
Fraguado final máximo (min)	320
Expansión autoclave máximo (%)	0.80
Expansión en agua máximo (%)	0.02
Resistencia a 3 días (MPa)	9.0
Resistencia a 7 días (MPa)	16.0
Resistencia a 28 días (MPa)	26.0

Fuente: Elaboración propia

Además, también se tienen los parámetros químicos del cemento utilizado para la fabricación de las muestras de concreto, los cuales son:

Tabla 16 Parámetros químicos del cemento utilizado en los ensayos.

Parámetros	
MgO (%)	6.00
SO (%)	3.50

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.2 Prueba de fluorescencia de rayos X

Más, sin embargo, al cemento si se le pudo hacer la prueba de fluorescencia de igual forma que se hizo con los agregados. Mediante este ensayo se puede conocer toda la composición química del dicho cemento, la cual muestra que:

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

Tabla 17 Composición química del cemento para la fabricación de las probetas.

<i>Elemento y/o compuesto</i>	<i>% en peso</i>
<b>CaO</b>	60.416
<b>SiO<sub>2</sub></b>	21.465
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.578
<b>SO<sub>3</sub></b>	4.653
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.835
<b>MgO</b>	1.415
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.719
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.625
<b>Cl</b>	0.430
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.359
<b>Sr</b>	0.249
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.179
<b>MnO</b>	0.051
<b>Zn</b>	0.019
<b>Rb</b>	0.008

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos fueron realizados en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia y fueron financiados con el presupuesto del proyecto a cargo del ingeniero Héctor Camilo Higuera Flores, Docente de la universidad Católica de Colombia.

## 2.3 METACAOLÍN

El material por utilizar es metacaolín de marca Corona, del cual se cuenta con la información siguiente:

### 2.3.1 Caracterización química del metacaolín

Relación de componentes químicos presentes en el aditivo metacaolín:

Tabla 18 Caracterización Química

<i>Componente</i>	<i>Cantidad (%)</i>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	52,5
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	44,9
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,5
<b>CaO</b>	0,1

Fuente: Elaboración propia

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

Los ensayos fueron realizados en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia y fueron financiados con el presupuesto del proyecto a cargo del ingeniero Héctor Camilo Higuera Flores, Docente de la universidad Católica de Colombia.

### 2.3.2 Caracterización física del metacaolín

Tabla 19 Caracterización Física

<i>Componente</i>	<i>Característica</i>
<i>Perdida al fuego (%)</i>	<i>0,55</i>
<i>Gravedad específica (g/cm3)</i>	<i>2,48</i>

Fuente: Elaboración propia

### 3. DISEÑO DE MEZCLAS

Para obtener resultados significativos de la inclusión del metacaolín como aditivo de las mezclas de concreto, se proponen diseños de mortero con porcentajes variables de metacaolín, buscando la relación de mezcla que obtenga mayor permeabilidad a los efectos de cloruros presentes en el medio ambiente. Los porcentajes de metacaolín propuestos son:

- 0 % muestra patrón como referencia del material sin aditivo: MK-0%.
- 10 % de contenido de metacaolín: MK-10%.
- 20 % de contenido de metacaolín: MK-20%.
- 30 % de contenido de metacaolín: MK-30%.

Los porcentajes de metacaolín son reemplazo del contenido de cemento tipo portland presentes en la mezcla, según lo explicado y basados en los parámetros establecidos en la norma **NTC 3937** "ARENA NORMALIZADA PARA ENSAYOS DE CEMENTO HIDRÁULICO".

Para el diseño de mezcla, la norma maneja las siguientes relaciones:

- Agua - Cemento: **a/c = 0,43**
- Cemento - agregado: **c – ag = 1 : 2,75**

Tomando como base las relaciones de materiales expuestas en la norma y las densidades encontradas para cada material, las relaciones de mezcla ejecutadas para fundir 3 cilindros por cada relación de cemento metacaolín son:

Tabla 20 Mezcla 1 - 0% Metacaolín

MK-0%		
Material	Cantidad	Unidades
<b>Cemento</b>	2.89	kg
<b>Agua</b>	1.32	kg
<b>Arena</b>	7.94	kg
<b>MK</b>	0.00	kg

Fuente: Elaboración propia

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

Tabla 21 Mezcla 2 - 10% Metacaolín

<b>MK-10%</b>		
<i>Material</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidades</i>
<b>Cemento</b>	2.60	kg
<b>Agua</b>	1.32	kg
<b>Arena</b>	7.94	kg
<b>MK</b>	0.29	kg

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22 Mezcla 3 - 20% Metacaolín

<b>MK-20%</b>		
<i>Material</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidades</i>
<b>Cemento</b>	2.31	kg
<b>Agua</b>	1.32	kg
<b>Arena</b>	7.94	kg
<b>MK</b>	0.58	kg

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23 Mezcla 4 - 30% metacaolín

<b>MK-30%</b>		
<i>Material</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidades</i>
<b>Cemento</b>	2.02	kg
<b>Agua</b>	1.32	kg
<b>Arena</b>	7.94	kg
<b>MK</b>	0.87	kg

Fuente: Elaboración propia

Nota: Para la elaboración de los cubos de mortero destinados para los ensayos de resistencia a la compresión, se mantienen las mismas proporciones entre los ingredientes, ajustándose al volumen del cubo con lado de 50 mm.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

## 4. ELABORACIÓN DE MUESTRAS

### 4.1 ELABORACIÓN DE MUESTRAS CILÍNDRICAS DE MORTERO

Se realiza el procedimiento de elaboración y curado de las muestras de concreto en el laboratorio, bajo estricto control de calidad de los materiales y las condiciones adecuadas para realizar el ensayo, según lo estipulado en la norma.

Equipos:

- Moldes en acero o hierro
- Varilla compactadora
- Martillo
- Recipientes para muestreo y mezcla
- Balanzas
- Mezcladora de concreto

#### 4.1.1 Procedimiento:

##### 4.1.1.1 Pesaje de materiales

Se inicia tomando el peso de la tara, con la cual se calibra la medida de la báscula, se procede a realizar el pesaje de los materiales (cemento, arena, metacaolín y agua) según lo dispuesto en el diseño de mezcla.

Ilustración 7 Pesaje Material



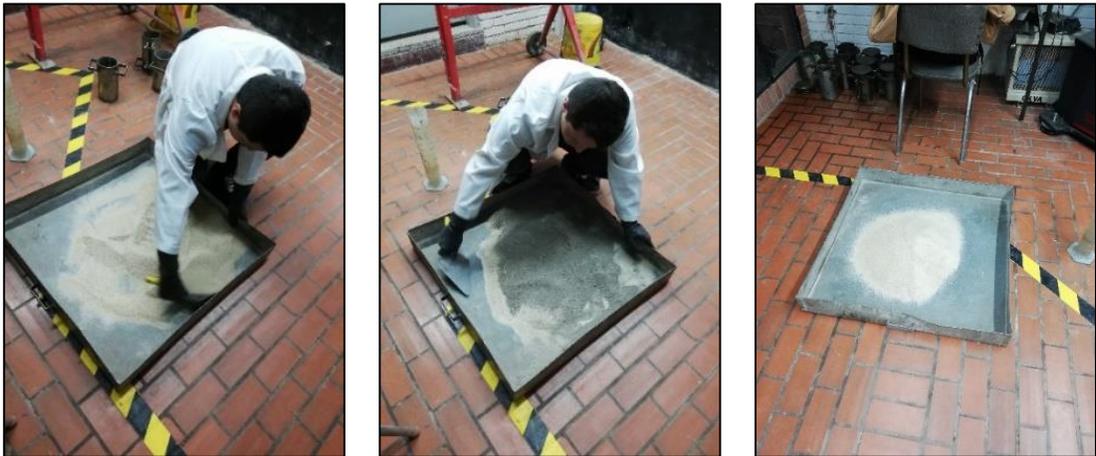
Fuente: Elaboración propia

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

#### 4.1.1.2 Mezcla homogénea en seco

Se procede a homogeneizar los materiales en seco para conseguir una mejor mezcla, se usa una superficie delimitada evitando pérdidas significativas de material.

Ilustración 8 Mezcla homogénea cemento, arena y metacaolín



Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.1.3 Adición de agua.

Una vez lograda una mezcla homogénea en seco, se agrega agua, se realiza secuencialmente para facilitar el proceso de mezcla, al hidratar la mezcla inicia la reacción puzolánica del cemento, el proceso de amasado de la mezcla se debe continuar hasta lograr una masa plástica y manejable.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

Ilustración 9 Hidratación mezcla

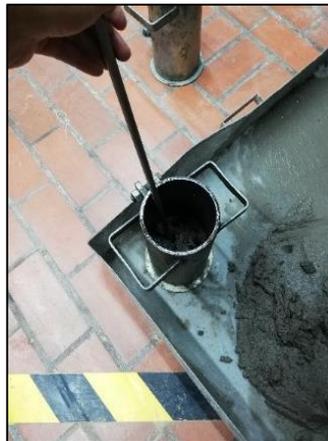


Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.1.4 Fundida de cilindros

Se procede a vaciar la mezcla a los cilindros en 3 pasos, primero se llena una tercera parte del cilindro y se apisona la capa inicial se apisona, introduciendo la varilla hasta el fondo del molde 25 veces. Golpear ligeramente los lados del molde para eliminar zonas de vacío y burbujas de aire presentes en la mezcla, dando golpes con el martillo de caucho, estos pasos se realizan 3 veces.

Ilustración 10 Fundida de cilindros



Fuente: Elaboración propia

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

#### 4.1.1.5 Fraguado de las muestras

Las muestras deben ser retiradas del molde entre 24 y 48 horas, para realizar el proceso de curado se debe realizar la inmersión de las muestras en agua, se dispone una “piscina de muestras” o en un cuarto húmedo.

Ilustración 11 Fraguado de muestras



Fuente: Elaboración propia

## 4.2 ELABORACIÓN DE MUESTRAS CUBICAS DE MORTERO

Para la elaboración de las muestras de mortero se tomó como referencia la norma NTC 220 “CEMENTOS. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO USANDO CUBOS DE 50 mm o 50,8 mm DE LADO” se manejan las mismas proporciones utilizadas en el diseño de mezcla.

Los moldes para las muestras serán ungidos con aceite o querosene para evitar que la mezcla quede pegada a la superficie.

Después de fundidos los elementos, deben ser desencofrados entre 24 y 48, para posteriormente ser sumergidos en agua y cal durante un tiempo no menor a 28 días.

Ilustración 12 Muestra para ensayo de resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

## 5. ENSAYOS DE MUESTRAS

Con la adición del metacaolín en el diseño de mezcla, se verificarán los cambios posibles en las propiedades físicas y mecánicas de las muestras de ensayo.

### 5.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Tomando como referencia la norma INV-E-323-13 “RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO” se procede a fallar muestras cubicas de 50 mm cada lado, las cuales están adicionadas con metacaolín a razón del 10%, 20% y 30% reemplazando el mismo porcentaje de cemento hidráulico.

Las muestras se extraen de la piscina de curado y se secan superficialmente, se eliminan impurezas presentes en las caras de contacto dispuestas para el ensayo, se verifica que las caras de contacto para el ensayo no presenten curvaturas o pandeos de gran importancia.

En los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia, se utilizó la maquina universal de ensayos “MTS EXCEED E45”, se ubica la muestra centrada en las placas de la maquina “*Ilustración 13 Ubicación de muestra*”, se aplicó carga de forma constante a razón de 0.1 mm/s hasta la falla de la muestra “*Ilustración 14 Falla de muestra*”, se tomó control de las cargas obtenidas en el momento de la falla, se repitió el proceso con cada una de las muestras propuestas en el diseño de mezcla.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	--

### 5.1.1 Registro fotográfico

Ilustración 13 Ubicación de muestra



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 14 Falla de muestra



Fuente: Elaboración propia

## 5.2 DENSIDAD, ABSORCIÓN Y RELACIÓN DE VACÍOS

Con el cambio de materiales presentes en las mezclas diseñadas para efectos de esta investigación, se desea calcular los cambios de densidad, absorción y relación de vacíos en las muestras de estudio. Se llevaron a cabo ensayos con la norma ASTM-C642 “Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”.

Las muestras cilíndricas de 4” de Ø y 8” de alto, se extraen de la piscina de curado después de cumplir los 28 días de estar sumergidas, se enviaron a corte para generar muestras de 4” de Ø y 2” de alto.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	--

En los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia se utiliza una báscula de precisión debidamente calibrada, se toma la masa de cada muestra en estado SSS “Saturado Superficialmente Seco”, posteriormente se suspende la muestra en una canastilla sumergida en agua, con la canastilla conectada a las bascula se toma el valor de la masa aparente, al extraer la muestra se seca superficialmente y se toma la masa de la muestra después de sumergida “*Ilustración 16 Toma de masa*”, este proceso se repite para todas las muestras.

Todas las muestras son colocadas en el horno durante 24 horas a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , posterior a las 24 horas, se retiran las muestras del horno y se toma la masa de cada una “*Ilustración 17 Secado de muestras en el horno*”.

Ilustración 15 Ecuaciones de cálculo ASTM C-642

<p>Absorption after immersion, % = <math>[(B - A)/A] \times 100</math> (1)</p> <p>Absorption after immersion and boiling, % = <math>[(C - A)/A] \times 100</math> (2)</p> <p>Bulk density, dry = <math>[A/(C - D)] \cdot \rho = g_1</math> (3)</p> <p>Bulk density after immersion = <math>[B/(C - D)] \cdot \rho</math> (4)</p> <p>Bulk density after immersion and boiling = <math>[C/(C - D)] \cdot \rho</math> (5)</p> <p>Apparent density = <math>[A/(A - D)] \cdot \rho = g_2</math> (6)</p> <p>Volume of permeable pore space (voids), % = <math>(g_2 - g_1)/g_2 \times 100</math> (7)</p> <p>or <math>(C - A)/(C - D) \times 100</math></p>	<p>where:</p> <p><i>A</i> = mass of oven-dried sample in air, g</p> <p><i>B</i> = mass of surface-dry sample in air after immersion, g</p> <p><i>C</i> = mass of surface-dry sample in air after immersion and boiling, g</p> <p><i>D</i> = apparent mass of sample in water after immersion and boiling, g</p> <p><i>g</i><sub>1</sub> = bulk density, dry, Mg/m<sup>3</sup> and</p> <p><i>g</i><sub>2</sub> = apparent density, Mg/m<sup>3</sup></p> <p><math>\rho</math> = density of water = 1 Mg/m<sup>3</sup> = 1 g/cm<sup>3</sup>.</p>
---	---

Fuente: ASTM-C642 “Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete

### 5.2.1 Registro fotográfico

Ilustración 16 Toma de masa



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 17 Secado de muestras en el horno



Fuente: Elaboración propia

### 5.3 SORTIVIDAD

Con base en la norma ASTM-C1585 “measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes” se llevan a cabo los ensayos en las muestras.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

Con los especímenes de estudio secados al horno durante 24 horas, se toma el valor de la masa seca como dato inicial del ensayo, posterior se expone una cara del material de análisis al contacto con el agua “*Ilustración 18 Laboratorio Sortividad*”, se hace control de los valores de la masa según los tiempos establecidos en la norma “1 min., 5 min., 10 min., 20 min., 30 min., 60 min., 120 min. Y 180 min.”, este proceso se aplica secuencialmente a todas las muestras de estudio.

### 5.3.1 Registro fotográfico

Ilustración 18 Laboratorio Sortividad



Fuente: Elaboración propia

### 5.4 COEFICIENTE DE MIGRACIÓN DE CLORUROS

Para efectos de este trabajo de investigación, se implementa el ensayo NT BUILD 492 “CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE MIGRATION EXPERIMENTS”.

Las muestras cilíndricas son cortadas en rebanadas de 5 cm de altura, se colocan unas bases inclinadas sumergidas en una solución de Cloruro de Sodio (NaCl), se aplica una carga eléctrica externa como se muestra en la “*Ilustración 20 Ensayo de Migración de Cloruros*”, la cual se aplica directamente a la muestra de forma axial, la carga inicia en 30 V por un tiempo de 24 horas.

Después de las 24 horas, se divide la muestra en dos partes, tomando como eje el diámetro del disco, se identifica la fracción más sumergida en la solución de Cloruro de sodio (NaCl), por la sección del corte se rocía una solución de nitrato de plata, al

secar la superficie se toman mide desde la base del semi-disco hasta el punto máximo de penetración como se evidencia en la “*Ilustración 21 Muestra cortada axialmente cubierta con nitrato de plata*”, se toman medidas cada 10 mm entre sí.

Ilustración 19 Ecuaciones de cálculo NT BUILD 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)L x_d}{U-2}} \right) \quad (4)$$

where:

$D_{nssm}$ : non-steady-state migration coefficient,  $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  
 $U$ : absolute value of the applied voltage, V;  
 $T$ : average value of the initial and final temperatures in the anolyte solution, °C;  
 $L$ : thickness of the specimen, mm;  
 $x_d$ : average value of the penetration depths, mm;  
 $t$ : test duration, hour.

Fuente: NT BUILD 492 “CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE MIGRATION EXPERIMENTS”

### 5.4.1 Registro fotográfico

Ilustración 20 Ensayo de Migración de Cloruros



Fuente: Elaboración propia

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019 VERSIÓN 0</p>
---	---	---------------------------------------

Ilustración 21 Muestra cortada axialmente cubierta con nitrato de plata



Fuente: Elaboración propia

 <b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN	<b>FECHA: MAYO-2019</b>  <b>VERSIÓN 0</b>
---	--	---

## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos de los ensayos para calificar las propiedades físico-mecánicas y de permeabilidad en los morteros de cemento hidráulico adicionados con metacaolín, permiten identificar los parámetros máximos y mínimos para adicionar este complemento en las distintas mezclas de morteros y concretos, esto con el fin de aumentar la vida útil de los elementos estructurales que se encuentran en constante exposición a cloruros presentes en el medio ambiente, los cuales aumenta la corrosión de los de los hierros de refuerzos embebidos en los elementos de concreto reforzado.

### 6.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Basados en la metodología definida en la norma INV E323-13 “RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTEROS DE CONCRETO HIDRÁULICO” se lleva a cabo el ensayo, con los datos obtenidos se encuentran los siguientes resultados.

#### 6.1.1 Resultados

Tabla 24 Resistencia a la compresión

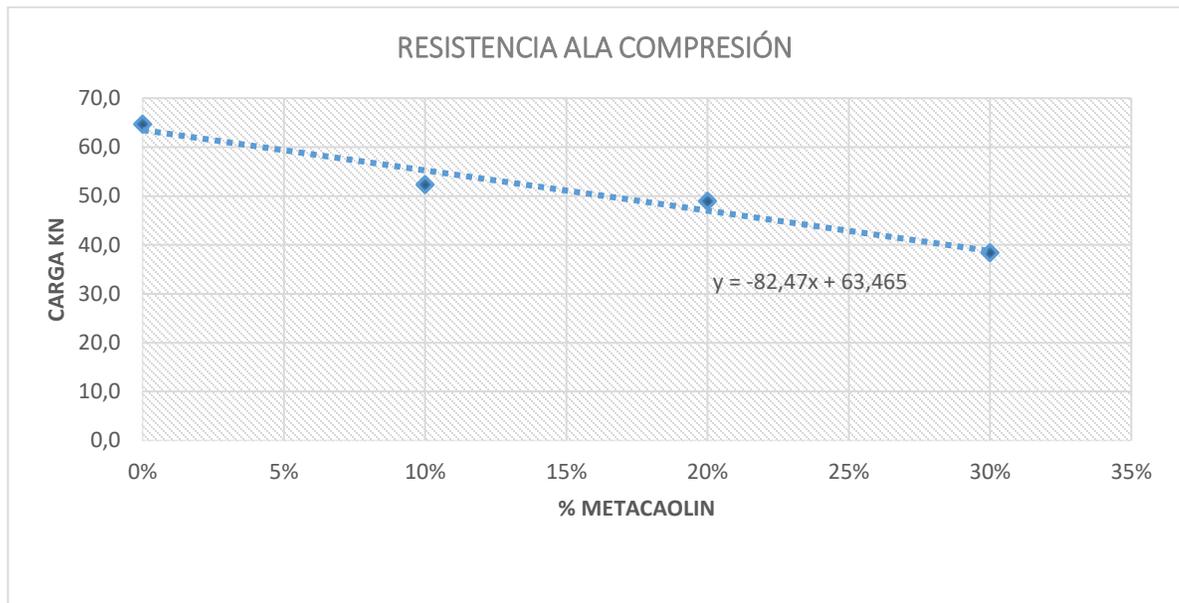
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN								
%	Muestra	Despla.	Carga	Carga Prom.	Tiempo	Deformación	F'c	F'c
		mm	kN	kN	seg		MPa	MPa
0%	1	0,6	58,6	64,7	29,1	0,0012	23,5	25,9
	2	0,8	65,6		39,8	0,0017	26,2	
	3	0,7	70,0		31,9	0,0013	28,0	
10%	1	0,7	59,0	52,3	7,1	0,0014	23,6	20,9
	2	0,7	33,8		7,0	0,0014	13,5	
	3	0,7	64,2		7,1	0,0014	25,7	
20%	1	1,2	47,6	49,0	7,1	0,0024	19,0	19,6
	2	1,0	54,6		7,2	0,0019	21,8	
	3	1,2	44,6		7,2	0,0024	17,8	
30%	1	0,9	30,4	38,4	7,1	0,0017	12,2	15,3
	2	0,6	45,6		7,0	0,0012	18,3	
	3	0,7	39,0		7,0	0,0013	15,6	

Fuente: Elaboración propia

De los resultados presentados en la “Tabla 24 Resistencia a la compresión” se obtienen la gráfica 4 “Carga Vs % Metacaolín” y Grafica 5 “F’c (Mpa) Vs % Metacaolín”.

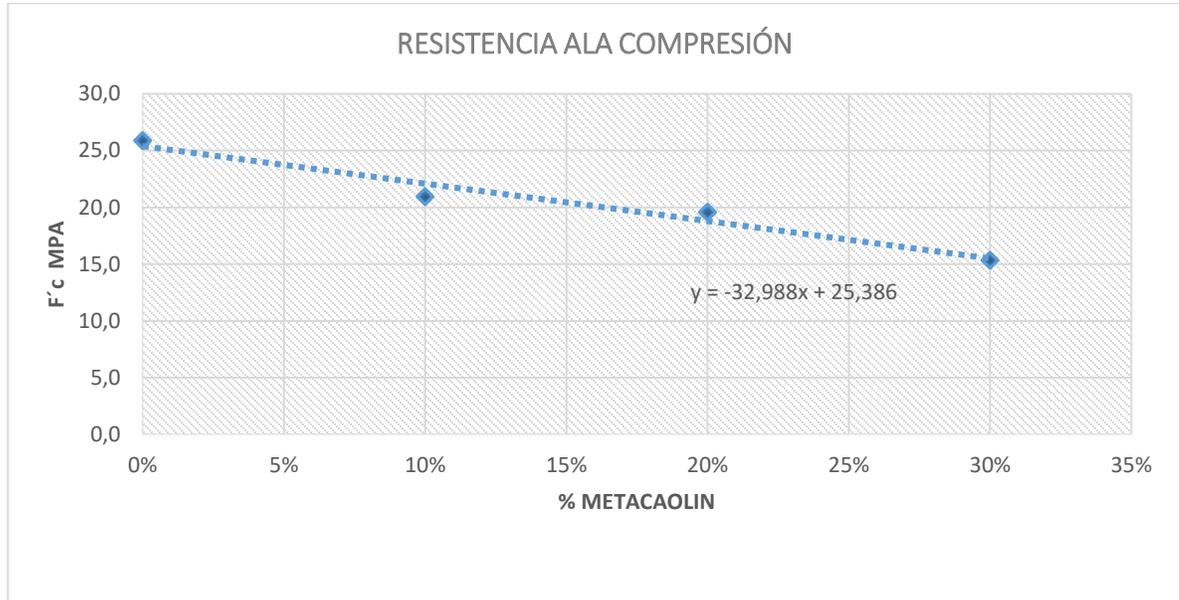
### 6.1.2 Análisis

Grafica 4 Carga Vs Metacaolín



Fuente: Elaboración propia

Grafica 5 Esfuerzo en F'c (MPa) Vs Metacaolín



Fuente: Elaboración propia

En las gráficas se observa que el aumento de metacaolín presenta en la mezcla es inversamente proporcional a la pérdida de resistencia a la compresión de los elementos fallados, como referencia en la muestra patrón con 0% de metacaolín, la carga máxima que soporta el elemento antes de fallar es de 64,72 KN “*Grafica 4 Carga Vs Metacaolín*” en un área de 2500 mm<sup>2</sup> dando como resultado un esfuerzo de 25,88 MPa o 3753 psi.

En la muestra con el 30% de metacaolín sustituyendo en igual medida el cemento, la carga máxima que aguanta la muestra es de 38,36 KN en un área de 2500 mm<sup>2</sup> dando como resultado un esfuerzo de 15,34 MPa o 2224psi.

Para la muestra que contiene el 10% de metacaolín la carga máxima que aguanta antes de fallar es de 52,34 KN en un área de 2500 mm<sup>2</sup> dando como resultado un esfuerzo de 20,93 o 3035 psi “*Grafica 5 Esfuerzo en F'c (MPa) Vs Metacaolín*”, este resultado se debe resaltar pues mantiene la carga y esfuerzo de forma moderada para su uso en sistemas constructivos.

## 6.2 DENSIDAD, ABSORCIÓN Y RELACIÓN DE VACÍOS

Estos ensayos fueron realizados según la norma ASTM-C642 “Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”.

### 6.2.1 Resultados absorción y relación de vacíos

Tabla 25 Resultados de Calculo Absorción y volumen de vacíos

RESULTADOS DE CALCULO								
%	MUESTRA	Absorción despues de curado %	Absorción despues de inmersión %	Promedio Absorción %	Volumen de vacios %	Promedio Vol vacios %	Volumen de vacios por despeje (m³)	Volumen de vacios por formula (m³)
0%	1	8.2	8.4	8.5	10.4	10.3	2.52E-05	1.69E-05
	2	9.0	9.2		11.3		3.07E-05	1.83E-05
	3	7.8	7.8		9.2		6.49E-05	3.73E-05
10%	1	5.1	5.2	4.9	6.1	5.7	4.41E-05	2.49E-05
	2	4.5	4.5		5.2		3.86E-05	2.13E-05
	3	5.0	5.0		5.9		4.24E-05	2.37E-05
20%	1	5.6	5.5	5.0	6.3	5.7	4.64E-05	2.56E-05
	2	4.2	4.2		4.9		3.60E-05	1.98E-05
	3	5.1	5.2		5.9		4.34E-05	2.40E-05
30%	1	5.6	5.6	5.1	6.5	5.8	4.54E-05	2.62E-05
	2	4.6	4.6		5.3		3.89E-05	2.15E-05
	3	5.0	5.0		5.7		4.10E-05	2.30E-05

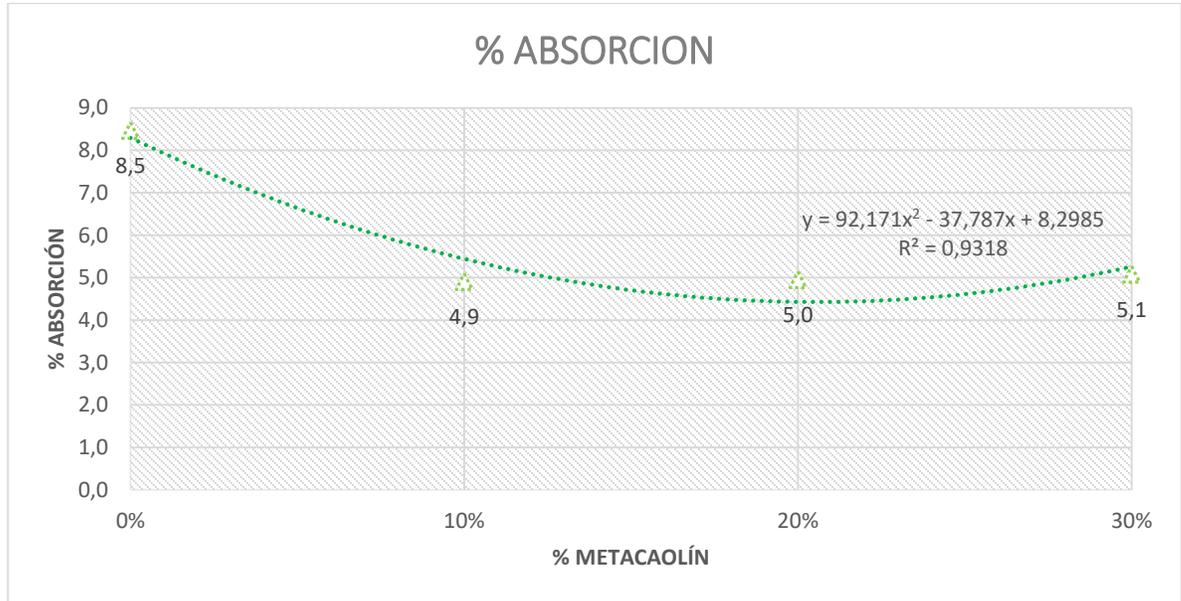
Fuente: Elaboración propia

### 6.2.2 Análisis absorción y relación de vacíos

Se analizan los resultados presentados en la “Tabla 25 Resultados Calculo Absorción y volumen de vacíos”.

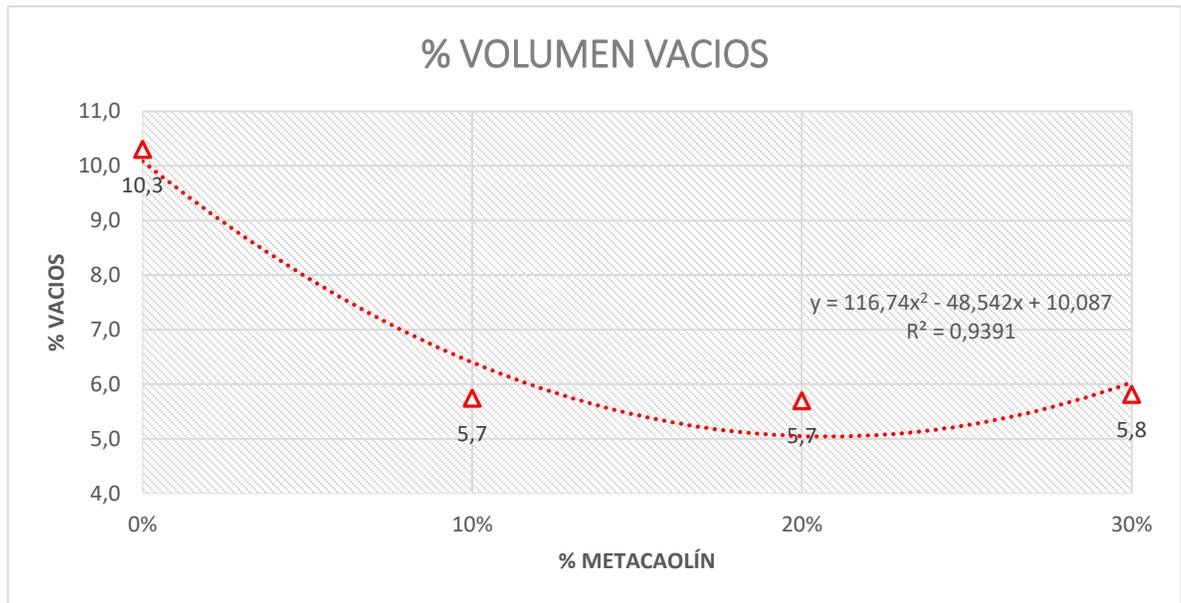
Al graficar la información referente a la absorción “Grafica 6 % Absorción Vs % Metacaolín” y % de vacíos “Grafica 7 % Vacíos Vs % Metacaolín”.

Grafica 6 %Absorción Vs %Metacaolín



Fuente: Elaboración propia

Grafica 7 %Vacíos Vs %Metacaolín



Fuente: Elaboración propia

 <b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN	<b>FECHA: MAYO-2019</b>  <b>VERSIÓN 0</b>
---	--	---

En las muestras con adición y sin adición de metacaolín, se observa que la muestra patrón, tiene un rango de absorción 1,7 veces mayor que el promedio de las muestras adicionadas con metacaolín, las cuales varían entre sí del 2 al 4%. Con una línea de tendencia polinómica, se encuentra un ajuste de datos del 93% en el cual se aprecia como el porcentaje de absorción disminuye en un 41% desde la muestra del 10% de metacaolín y se mantiene este indicador hasta el 30% de metacaolín.

Para el volumen de vacíos se observa que la muestra patrón tiene un volumen de vacíos 1,8 veces mayor que el promedio de las muestras adicionadas con metacaolín, las cuales varían entre sí del 1 al 2%, por tanto, el volumen de vacíos en la muestra patrón es del 10%. Y de las muestras adicionadas con metacaolín, oscila entre el 4.9 y el 5.1% aproximadamente. Los datos son verificados con una línea de tendencia polinómica, la cual muestra un  $R^2$  del 94%, del promedio de los datos obtenidos con metacaolín se puede obtener una reducción en el % de volumen de vacíos del 45% con respecto a la muestra patrón.

### 6.2.3 Resultados densidad

Tabla 26 Resultados Cálculo de Densidad

RESULTADOS DE CALCULO									
%	MUESTRA	Densidad bulk (g <sub>1</sub> )	Promedio Densidad bulk	Densidad bulk despues de inmersión	Promedio Densidad bulk despues de inmersión	Densidad aparente (g <sub>2</sub> )	Promedio Densidad aparente	Volumen de vacios %	Promedio Vol vacios %
0%	1	2055.4	2031.0	2224.9	2200.7	2483.1	2453.9	10.4	10.3
	2	2024.9		2207.9		2489.5		11.3	
	3	2012.6		2169.2		2389.0		9.2	
10%	1	2060.0	2061.6	2165.5	2162.0	2307.2	2293.9	6.1	5.7
	2	2062.7		2155.1		2274.4		5.2	
	3	2062.0		2165.5		2300.1		5.9	
20%	1	2039.7	2049.7	2153.1	2151.3	2298.1	2281.4	6.3	5.7
	2	2076.1		2163.7		2274.7		4.9	
	3	2033.1		2137.0		2271.3		5.9	
30%	1	2027.2	2040.8	2141.1	2144.5	2289.0	2276.9	6.5	5.8
	2	2055.5		2150.1		2270.7		5.3	
	3	2039.7		2142.3		2270.9		5.7	

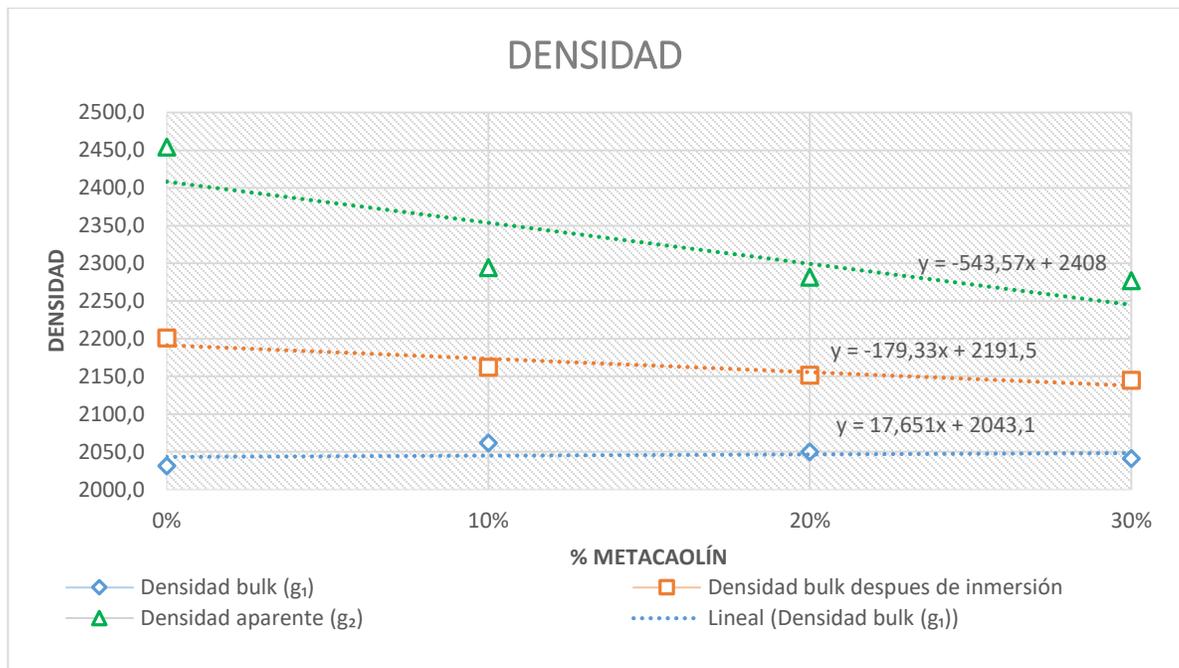
Fuente: Elaboración propia

### 6.2.4 Análisis densidad

Se analizan los resultados presentados en la “Tabla 26 Resultados Calculo de Densidad”.

En la “Gráfica 8 Densidad Vs %Metacaolín” se observa como la densidad de los elementos de ensayo adicionadas y no adicionadas con metacaolín se mantienen en un rango estable oscilando entre 2030 a 2060 Kg/m<sup>3</sup> tomando los datos después de los 28 días de curado.

Grafica 8 Densidad Vs % Metacaolín



Fuente: Elaboración propia

Al sumergir las muestras para la toma de masa aparente, los valores disminuyen en función del aumento de metacaolín presente en cada ejemplar, por lo cual la tendencia que se muestra en la gráfica para densidad aparente disminuye, de lo anterior se puede inferir que el metacaolín es menos denso que el cemento y al estar sumergido opone mayor resistencia a la gravedad que la muestra patrón.

Con la muestra saturada superficialmente seca se toma de nuevo la masa, la cual en función del metacaolín presente en cada espécimen disminuye la relación de

 <b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN	<b>FECHA: MAYO-2019</b>  <b>VERSIÓN 0</b>
---	--	---

vacíos y absorción, por lo cual la masa no aumenta gradualmente después de ser sumergida, por tanto, la densidad disminuye en función del aumento de metacaolín a razón de 19 Kg/m<sup>3</sup> por cada 10% de metacaolín que aumenta.

### 6.3 SORTIVIDAD

Los ensayos fueron realizados según la norma ASTM-C1585” Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes”.

#### 6.3.1 Resultados

Tabla 27 Sortividad

Tiempo (min)	0	1	5	10	20	30	60	120	180
MUESTRA	Masa (Kg)								
0%-1	0.8298	0.8469	0.8502	0.8513	0.8539	0.8552	0.8586	0.8628	0.867
0%	0.8298	0.8469	0.8502	0.8513	0.8539	0.8552	0.8586	0.8628	0.8670
10%-1	0.8479	0.853	0.855	0.857	0.859	0.860	0.863	0.866	0.867
10%-2	0.8554	0.860	0.861	0.862	0.864	0.865	0.866	0.868	0.870
10%-3	0.8446	0.849	0.851	0.852	0.853	0.854	0.856	0.858	0.859
10%	0.8493	0.8540	0.8557	0.8570	0.8587	0.8597	0.8617	0.8640	0.8653
20%-1	0.8418	0.848	0.850	0.852	0.853	0.855	0.858	0.860	0.862
20%-2	0.8562	0.860	0.862	0.864	0.865	0.866	0.867	0.867	0.870
20%-3	0.8415	0.847	0.849	0.849	0.851	0.852	0.854	0.856	0.857
20%	0.8465	0.8517	0.8537	0.8550	0.8563	0.8577	0.8597	0.8610	0.8630
30%-1	0.8048	0.811	0.812	0.814	0.816	0.817	0.820	0.823	0.824
30%-2	0.8438	0.849	0.850	0.852	0.853	0.854	0.856	0.858	0.859
30%-3	0.8214	0.826	0.828	0.829	0.830	0.831	0.833	0.834	0.835
30%	0.8233	0.8287	0.8300	0.8317	0.8330	0.8340	0.8363	0.8383	0.8393

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28 Absorción I (mm)

ABSORCIÓN					
Tiempo (S)	√Tiempo (s)	I (mm) MK-0%	I (mm) MK-10%	I (mm) MK-20%	I (mm) MK-30%
0	0,0	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
60	7,7	2,E-03	6,E-04	6,E-04	7,E-04
300	17,3	4,E-04	2,E-04	2,E-04	2,E-04
600	24,5	1,E-04	2,E-04	2,E-04	2,E-04
1200	34,6	3,E-04	2,E-04	2,E-04	2,E-04
1800	42,4	2,E-04	1,E-04	2,E-04	1,E-04
3600	60,0	4,E-04	2,E-04	2,E-04	3,E-04
7200	84,9	5,E-04	3,E-04	2,E-04	2,E-04
10800	103,9	5,E-04	2,E-04	2,E-04	1,E-04

Fuente: Elaboración propia

### 6.3.2 Análisis

Se analizan los resultados presentados en la “Tabla 27 Sortividad” y según lo establecido en la norma ASTM-C1585, se crea la “Tabla 28 Absorción I (mm)”.

$$I = \frac{m}{a * d}$$

*I = absorción en mm.*

*m = diferencial de masa entre toma de datos.*

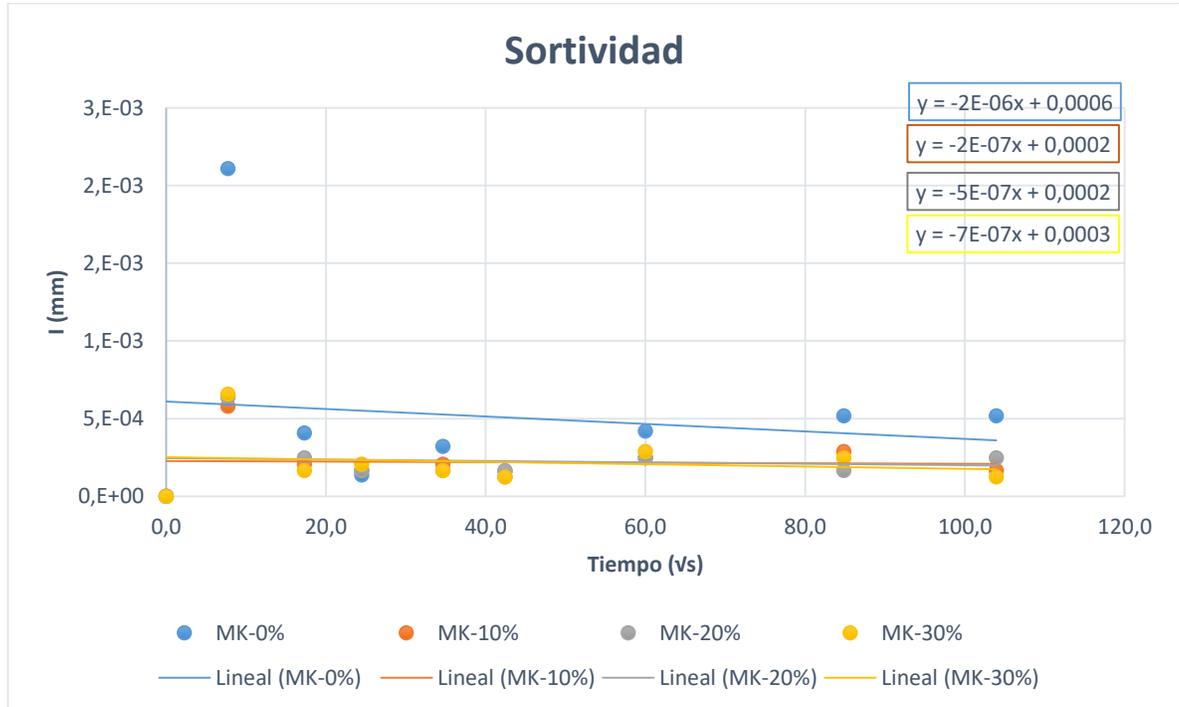
*a = área de la muestra en contacto con el agua.*

*d = densidad del agua en g/cm<sup>3</sup> (0,001 g/cm<sup>3</sup>).*

La toma de información se hizo en un rango de tres horas, tomando datos de masa según los tiempos estipulados en la norma, la masa inicial en el minuto cero, corresponde a la muestra secada al horno durante 24 horas a 110° ± 5°C.

Los datos obtenidos de las muestras analizadas mediante el ensayo de Sortividad, son graficados en la “Grafica 9 Masa Vs %Tiempo Sortividad”.

Grafica 9 Masa Vs %Tiempo Sortividad



Fuente: Elaboración propia

Los datos resultantes de los distintos ejemplares son promediados, los resultados muestran un aumento de masa en cada muestra por la absorción de agua la cual llena los vacíos presentes en cada ejemplar, la muestra patrón con 0% de metacaolín en amarillo, la muestra con el 10% de metacaolín en azul, la muestra con el 20% de metacaolín en naranja y la muestra con el 30% de metacaolín en verde.

La muestra patrón con el 0% de metacaolín inicia con una masa de 0,83 Kg y termina en 0,87 Kg lo cual da una tendencia de aumento de  $1 \cdot 10^{-4}$  Kg/min, para las muestras del 10% y 20% de metacaolín tienen masas similares y el aumento de masa por absorción tiende a  $7 \cdot 10^{-5}$  Kg/min, con este rango de absorción menor al del 0% las muestras no superan la masa final de la muestra patrón.

Para la muestra del 30% de metacaolín la masa inicial es de 0,82 Kg, estando por debajo de la masa inicial del 0% de metacaolín, la razón de aumento de masa para este ejemplar es de  $7 \cdot 10^{-5}$  Kg/min, terminando con una masa final de 0,84 Kg.

En la “Grafica 9 Masa Vs %Tiempo Sortividad” el comportamiento de la muestra patrón indica una relación de poros mayor que en las muestras adicionadas con metacaolin, al linealizar los datos obtenidos se obtienen las pendientes, se encuentra que la muestra patrón tiene una absorción mayor a las muestras adicionadas con metacaolín con una pendiente decreciente de  $2 \cdot 10^{-6}$  mm/vs, mientras que las muestras con metacaolin tienen pendientes del orden de  $2 \cdot 10^{-7}$  mm/vs, por lo cual el índice de absorción disminuye al aumentar la relación de metacaolin presente en las muestras.

## 6.4 COEFICIENTE DE MIGRACIÓN DE CLORUROS

Estos ensayos fueron realizados según la norma *NT BUILD 492 “chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments”*

### 6.4.1 Resultados

Tabla 29 Datos Muestras

Muestra	Patron	Muestra	10% MK	Muestra	20% MK	Muestra	30% MK
T	21 °C						
L	50 mm						
U	30 V						
t	24 hr						
$x_d$	32.65 mm	$x_d$	31.45 mm	$x_d$	28.8 mm	$x_d$	27.65 mm
$D_{nssm}$	1544%	$D_{nssm}$	1484%	$D_{nssm}$	1353%	$D_{nssm}$	1296%
Muestra	Patron	Muestra	10% MK	Muestra	20% MK	Muestra	30% MK
T	21 °C						
L	51 mm	L	50 mm	L	50 mm	L	50 mm
U	30 V						
t	24 hr						
$x_d$	31.95 mm	$x_d$	31.70 mm	$x_d$	29.15 mm	$x_d$	28.8 mm
$D_{nssm}$	1538%	$D_{nssm}$	1497%	$D_{nssm}$	1370%	$D_{nssm}$	1353%
Muestra	Patron	Muestra	10% MK	Muestra	20% MK	Muestra	30% MK
T	21 °C						
L	50 mm						
U	30 V						
t	24 hr						
$x_d$	32.9 mm	$x_d$	31.40 mm	$x_d$	29.25 mm	$x_d$	28.65 mm
$D_{nssm}$	1557%	$D_{nssm}$	1482%	$D_{nssm}$	1375%	$D_{nssm}$	1345%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30 Resultados promediados NTB 492 NORDTEST METHOD

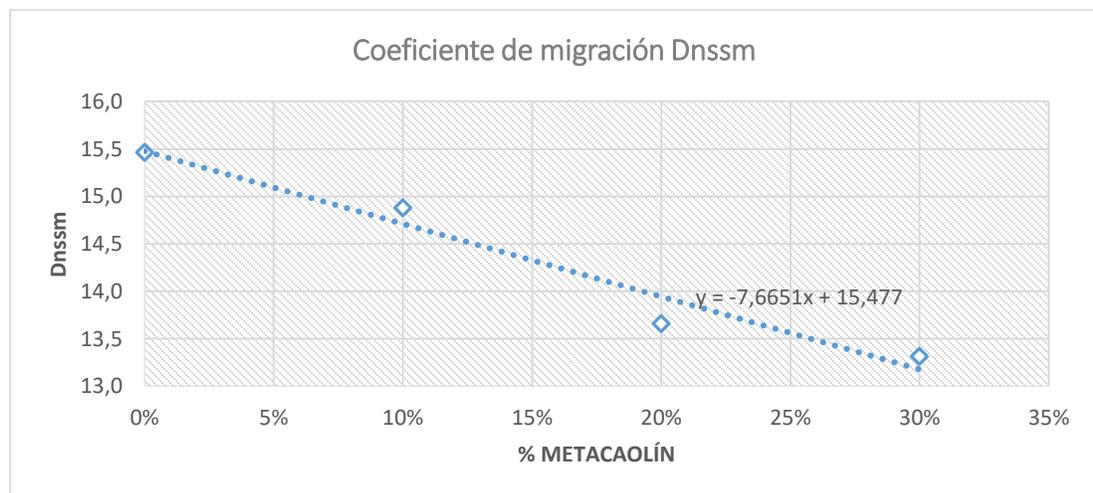
%	MUESTRA	Coefficiente de migración no estable ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	Promedio % Absorción
0%	1	15,4	15,5
	2	15,4	
	3	15,6	
10%	1	14,8	14,9
	2	15,0	
	3	14,8	
20%	1	13,5	13,7
	2	13,7	
	3	13,8	
30%	1	13,0	13,3
	2	13,5	
	3	13,5	

Fuente: Elaboración propia

#### 6.4.2 Análisis

Se analizan los resultados presentados en la “Tabla 29 Resultados promediados NTB 492 NORDTEST METHOD”.

Grafica 10 Difusión ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s) Vs %Metacaolín



Fuente: Elaboración propia

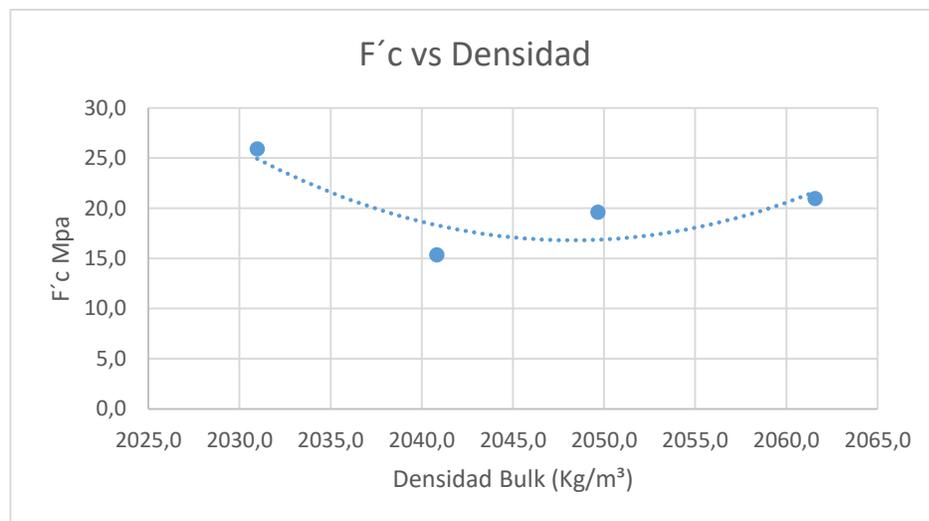
Los datos representados en la “*Grafica 11 Difusión ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s) Vs %Metacaolín*”, muestran la difusión de la solución de cloruro de sodio (NaCl) cargada con un campo eléctrico externo, a través de un medio “muestras de cemento hidráulico adicionado con metacaolín” en ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s).

Para la muestra patrón con 0% de metacaolín la difusión encontrada es de 15,46  $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s, con el aumento del rango de metacaolín presente en las muestras se da una tendencia a disminuir la difusión del (NaCl) a razón del 3.9% por cada 10% de metacaolín que se aumenta en la mezcla. Así la mezcla con 30% de metacaolín presenta una difusión de 13,31 $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s.

## 6.5 DISCUSIÓN

- La disminución de absorción de las muestras en función del aumento de metacaolín, concuerdan con la disminución de la relación de vacíos presentes en “*Grafica 6 % Absorción Vs % Metacaolín*”.
- La pérdida de densidad relacionada al aumento de metacaolín presente en la mezcla, está relacionado con la disminución de la capacidad de las muestras, para resistir cargas a compresión al incrementar el porcentaje de metacaolín que reemplaza al cemento hidráulico.

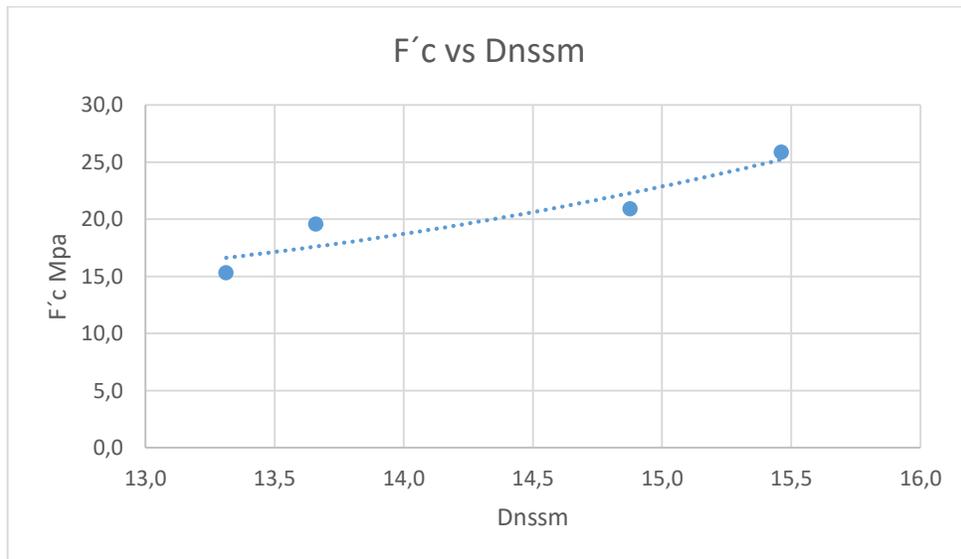
Grafica 11 F'c vs Densidad



Fuente: Elaboración propia

- La relación de vacíos disminuye con la adición de metacaolin en la mezcla a razón del 50% del valor presente en la muestra patrón, así mismo la difusión de cloruros efectuada a través del ensayo NT BUILD 492, disminuye gradualmente según el porcentaje de metacaolin presente en la mezcla diseñada.
- A mayor contenido de metacaolin en las mezclas de concretos, suceden distintos efectos los cuales están relacionados proporcionalmente, en el caso de la resistencia a la compresión, esta disminuye a mayor contenido de metacaolin, caso contrario a mayor contenido de metacaolin la difusión o penetración de cloruros en la muestra disminuye.

Grafica 12 F'c vs Dnssm



Fuente: Elaboración propia

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

- La dosificación de metacaolín en las mezclas de concreto tiende a disminuir la resistencia a la compresión de los elementos a base de cemento hidráulico, es de notar que la adición de máximo 10% de metacaolín mantiene una resistencia a la compresión optima dentro de los rangos establecidos por la “NSR-10/ D.3.5.3 — VALOR MÁXIMO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN” en morteros.
- La densidad de las muestras adicionas y no adicionadas con metacaolín, después del curado de 28 días para alcanzar su máxima resistencia, cumple con la densidad según lo establecido en la “NSR-10/ B.3.2 — MASAS Y PESOS DE LOS MATERIALES/ Tabla B.3.2-1 Masas de los materiales”.
- Con el aumento porcentual de metacaolín en las muestras, la relación de vacíos y la porosidad disminuye considerablemente, este resultado coincide con los resultados obtenidos mediante el ensayo NT BUILD 492 en cual se observa la disminución de la difusión y penetración de agentes externos en las muestras, así el rango de protección para los aceros de refuerzo aumenta y disminuye la probabilidad de corrosión.
- De la información obtenida a través de los ensayos efectuados a las muestras adicionadas y no adicionadas con metacaolín, se concluye que el material adicionado provee propiedades que mejoran la permeabilidad del concreto y se debe profundizar los estudios para parametrizar la dosificación de mayor eficiencia.
- Las muestras elaboradas para los ensayos dispuestos en este trabajo de investigación cumplieron con los estándares de calidad y resistieron de forma eficiente los procedimientos ejecutados sobre las mismas.
- Los materiales utilizados para la elaboración de muestras fueron caracterizados y verificados mediante ensayos de laboratorio, cumpliendo con los estándares de calidad exigidos según las normas relacionadas.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

- El montaje para el ensayo NT BUILD se hizo en las instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia, de esta forma se encuentra que la adición de metacaolin en reemplazo del cemento en mezclas de concreto, muestra mayor eficiencia en un rango entre el 5 al 10%, disminuyendo la penetración de cloruros, la porosidad, relación de vacíos y manteniendo la resistencia a la compresión “f’c” en valores óptimos.
- Con la información obtenida por medio de los ensayos de laboratorio hechos en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia, se logró valorar la incidencia del metacaolin como aditivo de mezclas de concreto, reemplazando un porcentaje de cemento hidráulico, la adición de este material genera cambios en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas de concreto, mejorando su permeabilidad, disminuyendo la relación de vacíos o afectando la resistencia a la compresión del elemento.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

## 7.2 RECOMENDACIONES

- Adicionando agregados gruesos a las mezclas propuestas, aumentaría la resistencia a la compresión, dando la posibilidad de calificar con mayor precisión las variaciones de las propiedades físico-mecánicas de los concretos adicionados con metacaolín.
- El siguiente paso en esta investigación, debe ser la elaboración de muestras de concreto adicionadas con metacaolín aumentando a razón del 1%, para encontrar el porcentaje óptimo en el cual no se pierda significativamente resistencia a la compresión y disminuya la relación de vacíos y absorción del material.
- Se recomienda aumentar el rango de muestras disponibles para dar mayor precisión a los resultados de ensayos y posterior análisis de estos.
- En la búsqueda de conocer el comportamiento que hay entre el metacaolín y el cemento, es bueno hacer una investigación de este proceso con un enfoque químico, así se puede dimensionar la relación entre los componentes químicos actuantes entre los materiales.
- Con una investigación más a fondo de las dosificaciones de metacaolín en mezclas con concreto hidráulico, se puede estandarizar las cantidades más adecuadas de adición del metacaolín, Según el nivel de exposición al medio ambiente, las cargas que van a trabajar sobre la estructura y el tipo de clima presente.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

## BIBLIOGRAFÍA

- GÓMEZ, Jaime, Tecnología del Concreto, Propiedades, *Materiales y Diseño de Mezclas*, 3 ed. 2010, Bogotá D.C. ASOCRETOS, 2010 Tomo 1 ISBN: 978-958-8564-03-6.
- MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. *Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros*, Universidad del Valle, Cali valle del cauca, 2018 59p.
- Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, *reglamento colombiano de construcción sismo resistente*, NSR 10, Título C-Concreto estructural, Colombia, Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2014, 41p.
- MONTAÑA, Cristhian Camilo y CARMONA, Rodrigo Alonso. *Impacto de las adiciones para concreto en la reducción de la permeabilidad al Ion Cloruro Vs la relación agua cemento*. Trabajo de grado. Bogotá D.C.: Universidad Católica De Colombia, 2015. 15p.
- MAYURI A. Chandak, *Influence of Metakaolin in Concrete Mixture: A Review*, The International Journal of Engineering and Science, 2018 38p.
- ABDELLI Kamal, *Influence of the origin of metakaolin on pozzolanic reactivity of mortars*, sciencedirect, 2016 231p.
- Norma Técnica Colombiana, *Especificación de desempeño para cemento hidráulico*, NTC 121, 18-06-2014, Bogotá D.C., 2018, 10p.
- NORDTEST METHOD, *Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*, NT BUILD-492, ED. 1999-11, 2018, 1p.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

- Rafik Abbas, Salah A. Abo-El-Enein, El-Sayed Ezza, *Propiedades y durabilidad del cemento con adición de metacaolín: mortero y hormigón*, Egipto, 17-diciembre 2010, 1p.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, *Guidelines for Concrete Mixtures Containing Supplementary Cementitious Materials to Enhance Durability of Bridge Decks*, Primera edición, 2007, WASHIGTON D.C., 21p.
- KOSMATKA, Steven H, Michelle L.Wilson-Design and Control of Concrete Mixtures-PCA, Bridges, Other Structures, and Hydraulics and Hydrology • Materials and Construction, Quinceava edición, Washigton D.C. 2011, 16 de Septiembre del 2018, 215p.
- NILSON, Arthur H, *Diseño de Estructuras de Concreto*, McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A., Duodécima edición, Bogotá D.C., 2001, 16 de septiembre del 2018, 211p.
- Escuela de Ingenieros Militares, Teniente Coronel Mauricio Moreno Rodríguez, Director Escuela de Ingenieros Militares, *Introducción al Concreto*, Bogotá D. C. 2010.
- Aditivos para concreto, INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO A. C., Primera edición, México 1982, 02 de mayo del 2019, 139p.
- Aditivos para concretos y morteros, ADIPOL, 02 de mayo del 2019, A9-08p.
- MUSTELIER, N. L. *Análisis de propiedades del transporte de humedad en bloques de hormigón*, Informes de la Construcción 2013, julio del 2013, Vol. 65.
- MONTEJO, Piratova Alfonso, *Tecnología y patología del concreto armado*, Universidad Católica, Bogotá D. C. 2013.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO Y DE PERMEABILIDAD A CLORUROS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE METACAOLÍN</p>	<p>FECHA: MAYO-2019  VERSIÓN 0</p>
---	---	--

- PARKER, Harry S. *Mecánica y resistencia de materiales: texto simplificado*, Limusa, México 2000.
- BEER, Ferdinand p, *Mecánica de materiales*, Quinta edición McGRAW-HILL., INTERAMERICANA, S.A., Quinta edición, Bogotá D.C 2009.
- Hamdy El-Diadamony, Ahmed A. Amer, Tarek M. Sokkary b, Samir El-Hoseny, *Hydration and characteristics of metakaolin pozzolanic cement pastes*, Housing and Building National Research Center, Cairo, Egipto, aceptado 25 de Mayo del 2015.
- Miguel Ángel Sanjuán Barbudo, Servando Chinchón Yepes, *INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN Y NORMALIZACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND*, Universidad de Alicante, 1ra edición, 10 de enero 2014