

ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO

**PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD  
DE CONCRETOS DE ULTRA ALTAS  
PRESTACIONES (UHPC), CON DIFERENTES  
MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS**

**DIANA CAROLINA JARAMILLO MURCIA**

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Posgrado en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2020



# **PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES (UHPC), CON DIFERENTES MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS**

**DIANA CAROLINA JARAMILLO MURCIA**

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

**Magíster en Ingeniería Civil**

Directora:

Ph.D. Nancy Torres Castellanos

Codirector:

Ing. Joaquín Abellán García

Línea de Investigación:

Comportamiento de Materiales de Construcción

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Posgrado en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2020



La tesis de maestría titulada “PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES (UHPC), CON DIFERENTES MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS”, presentada por Diana Carolina Jaramillo Murcia, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural.



Ing. Nancy Torres Castellanos, Ph.D

Directora de la tesis



M. Sc. Camilo José Vega

Jurado



Ing. Álvaro Guzmán, Ph.D

Jurado

Bogotá, D.C., 8 de julio de 2020

*A mis padres, que con su apoyo y amor incondicional  
han sido la principal motivación para dar cada paso en  
mi vida.*

## **Agradecimientos**

A mi Directora de Tesis, Doctora Nancy Torres Castellanos, por su guía y paciencia durante el desarrollo de la investigación, por compartir sus conocimientos y apoyo para la ejecución de los ensayos.

A mi Codirector el ingeniero Joaquín Abellan, por el tiempo dedicado a transmitir sus estudios en el tema, por su acompañamiento en cada etapa del presente trabajo y su invaluable apoyo moral.

A la Escuela Colombiana de Ingenieros Julio Garavito, por su apoyo para la realización de la investigación, a los laboratoristas en especial al señor Jairo Páez por su buena disposición, compañía y colaboración.





## Resumen

El UHPC (Ultra High Performance Concrete por sus siglas en inglés) se conoce como un material cementicio, con resistencia a la compresión mayor o igual a 150 MPa, mayor ductilidad a la tracción, tenacidad y propiedades de durabilidad en comparación con el concreto convencional. Así mismo, en el diseño de un UHPC, predominan criterios como la compacidad y el empaquetamiento de partículas, lo que lo diferencia de un concreto convencional. Los componentes típicos del UHPC son cemento, humo de sílice, otros materiales cementantes suplementarios (MCS), arena de sílice, aditivos superplastificantes de alto rango y agua.

Dentro de los componentes del UHPC, el contenido de cemento y el humo de sílice, por su mayor costo, incrementan el valor en la producción de la dosificación, es por esto que, la principal motivación para el desarrollo de la presente investigación fue la necesidad de brindar opciones para la sustitución parcial de cemento y humo de sílice por materiales cementantes suplementarios, tales como el polvo de vidrio con tamaño medio de partícula de 7  $\mu\text{m}$  y 28  $\mu\text{m}$  y carbonato de calcio, con el fin de lograr un material enfocado en la sostenibilidad y reducción de costos.

Se evaluaron dos dosificaciones identificadas como D2 y D3 las cuales fueron producto de la optimización de dosificaciones de UHPC realizadas con materias primas colombianas bajo criterios de flujo autocompactante. Se empleó el menor contenido posible de cemento, y se limitó la cantidad de humo de sílice a 100  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Los resultados se compararon con los obtenidos en una dosificación de control (dosificación D1) cuyos materiales cementantes son únicamente cemento y humo de sílice.

Adicionalmente se evaluó el desempeño de las dosificaciones tanto en estado fresco como endurecido a 7, 28 y 90 días de curado en agua. En estado fresco se realizaron ensayos de asentamiento y en estado endurecido se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, velocidad de pulso ultrasónico, absorción superficial

inicial, permeabilidad a los cloruros, obteniendo como resultado que la resistencia a la compresión de las dosificaciones D2 y D3 alcanzó valores por encima del 90% a los 90 días de curado, con respecto a la dosificación de control; sin embargo el desempeño de la dosificación D3 fue mejor frente a algunas propiedades de durabilidad, entre ellas la permeabilidad al ión cloruro y la absorción superficial inicial, con respecto a la dosificación de control.

**Palabras clave:** UHPC, polvo de vidrio, carbonato de calcio, durabilidad, concreto, resistencia a compresión.

## Abstract

UHPC (Ultra High Performance Concrete) is known as a cementitious material, with a compressive strength greater than or equal to 150 MPa, greater tensile ductility, toughness and durability properties compared to conventional concrete, likewise, in the design of a UHPC, criteria such as compactness and particle packing predominate, which differentiates it from conventional concrete, the typical components of the UHPC are cement, silica fume, other supplementary cementitious materials (MCS), silica sand, high range super plasticizer additives and water.

Among the components of UHPC, the content of cement and silica fume, due to their higher cost, increase the value in the production of the mixture, which is why the main motivation for the development of this research was the the need to provide options for the partial replacement of cement and silica fume by supplementary cementitious materials, such as glass powder with an average particle size of 7  $\mu\text{m}$  and 28  $\mu\text{m}$  and calcium carbonate, in order to achieve a material focused on the sustainability and cost reduction.

Two dosages identified as D2 and D3 were evaluated, which were the product of the optimization of UHPC mixtures made with Colombian raw materials under self-compacting flow criteria, the lowest possible content of cement was used, and the amount of silica fume was limited to 100kg/m<sup>3</sup>. The results were compared with those obtained in a reference mixture (D1 dosage) whose cementitious materials are only cement and silica fume.

Additionally, the performance of the dosages was evaluated both in the fresh and hardened state at 7, 28 and 90 days of curing in water. In the fresh state, a settlement test was carried out and in the hardened state, tests for compressive strength, modulus of elasticity, ultrasonic pulse speed, initial surface absorption, permeability to chlorides were performed, obtaining as a result that the compressive strength of the D2 and D3 dosages reached values above 90% at 90 days of curing, with respect to the control sample; however, the performance of D3 dosing was better compared to some durability properties, including chloride ion permeability and initial surface absorption, compared to control dosing.

**Keywords:** UHPC, glass dust, calcium carbonate, durability, concrete, compressive strength.



# Contenido

	Pág.
Tabla de contenido	
<b>Introducción .....</b>	<b>19</b>
<b>1. Marco teórico.....</b>	<b>23</b>
1.1 Cemento .....	24
1.2 Cemento Portland .....	24
1.2.1 Fabricación del cemento Portland.....	24
1.2.2 Composición química del cemento Portland .....	25
1.2.3 Tipos de cemento Portland .....	27
1.3 Humo de sílice .....	29
1.4 Carbonato de calcio .....	30
1.5 Polvo de vidrio.....	30
1.6 Arena silíceo .....	30
1.7 Aditivos superplastificantes de alto rango.....	31
<b>2. Estado del arte.....</b>	<b>32</b>
2.1 Concreto de ultra altas prestaciones (UHPC).....	32
2.2 Antecedentes para propiedades mecánicas .....	36
2.2.1 Resistencia a la Compresión .....	36
2.2.2 Módulo de elasticidad .....	38
2.2.3 Velocidad de pulso ultrasónico .....	39
2.3 Antecedentes para Durabilidad .....	39
2.3.1 Porcentaje de vacíos en concreto endurecido.....	40
2.3.2 Absorción superficial inicial.....	41
2.3.3 Permeabilidad al ión cloruro.....	41
2.4 Aspectos relacionados con el costo e impacto ambiental del UHPC .....	42
<b>3. Objetivos.....</b>	<b>44</b>
3.1 Objetivo General .....	44
3.2 Objetivos Específicos .....	44
<b>4. Programa experimental.....</b>	<b>45</b>
4.1 Materiales .....	45
4.1.1 Cemento .....	47
4.1.2 Humo de Sílice .....	48
4.1.3 Carbonato de calcio.....	48
4.1.4 Polvo de vidrio .....	49
4.1.5 Arena Silíceo .....	50
4.1.6 Aditivo superplastificante de alto rango.....	50

XIV PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETOS DE  
ULTRA ALTAS PRESTACIONES (UHPC), CON DIFERENTES MATERIALES  
CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS

---

4.1.7	Agua.....	51
4.2	Dosificaciones (D1, D2 y D3) .....	51
4.3	Densidad de empaquetamiento virtual .....	53
4.4	Modelo Anova a dos vías.....	55
4.5	Metodología.....	55
4.5.1	Preparación y vaciado de las muestras.....	55
4.6	Ensayos.....	62
4.6.1	Método de prueba estándar para el flujo de mortero de cemento hidráulico..	62
4.6.2	Resistencia a la Compresión .....	63
4.6.3	Módulo de Elasticidad .....	64
4.6.4	Velocidad de pulso ultrasónico .....	65
4.6.5	Porcentaje de vacíos en concreto endurecido .....	66
4.6.6	Absorción superficial inicial (ISAT) .....	69
4.6.7	Permeabilidad a los cloruros .....	71
<b>5.</b>	<b>Resultados y Discusión.....</b>	<b>73</b>
5.1	Propiedades de las dosificaciones en estado fresco .....	73
5.1.1	Método de prueba estándar para el flujo de mortero de cemento hidráulico..	73
5.1.1.1	Dosificaciones .....	73
5.2	Densidad de empaquetamiento virtual .....	74
5.3	Propiedades Mecánicas de las dosificaciones .....	75
5.3.1	Resistencia a la Compresión .....	75
5.3.1	Módulo de Elasticidad .....	78
5.3.1	Velocidad de pulso ultrasónico .....	84
5.4	Propiedades de durabilidad de las dosificaciones .....	87
5.4.1	Absorción superficial inicial (ISAT) .....	87
5.4.2	Permeabilidad a los cloruros .....	92
5.4.3	Porcentaje de vacíos en concreto endurecido .....	95
5.5	ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	99
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>100</b>
6.1	Conclusiones .....	100
6.2	Recomendaciones .....	101
<b>7.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>103</b>
<b>8.</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>111</b>
8.1	Datos Resultados Ensayo Resistencia a Compresión. ....	111
8.2	Datos Resultados Ensayo Módulo de Elasticidad .....	112
8.3	Datos Resultados Ensayo Velocidad de Pulso Ultrasónico .....	113
8.4	Datos Resultados Ensayo Tasa De Absorción Inicial (ISAT).....	114
8.5	Permeabilidad a los Cloruros .....	115
8.6	Porcentaje de vacíos en el concreto endurecido.....	116

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 2-1:</b> Microestructura de NPC [34].....	34
<b>Figura 2-2:</b> Microestructura de HPC (a) y UHPC (b) [34] .....	34
<b>Figura 4-1:</b> Distribución del tamaño de partícula de los materiales usados.[12]. .....	47
<b>Figura 4-2:</b> Cemento Río Claro [12]. .....	47
<b>Figura 4-3:</b> Humo de sílice [12]. .....	48
<b>Figura 4-4:</b> Carbonato de Calcio [12]. .....	49
<b>Figura 4-5:</b> Polvo de vidrio GP28 (izquierda) y GP7 (derecha) [12].....	49
<b>Figura 4-6:</b> Arena Silíceo [12]. .....	50
<b>Figura 4-7:</b> Superplastificante MasterGlenium. ....	51
<b>Figura 4-8:</b> Mezcladora (izquierda). Mezcla de agua y superplastificante (derecha) 57	
<b>Figura 4-9:</b> Punto de reacción (izquierda). Punto de fluidez (derecha).....	57
<b>Figura 4-10:</b> Consistencia del material al final de la dosificación.....	58
<b>Figura 4-11:</b> Moldes para cilindros de 7.5 cmx15 cm y 10 cmx20 cm. ....	59
<b>Figura 4-12:</b> Disposición de cilindros de 7.5 cmx15 cm y 10 cmx20 cm. ....	59
<b>Figura 4-13:</b> Moldes de cubos de 5cmx5cmx5cm. ....	60
<b>Figura 4-14:</b> Cilindros en curado.....	60
<b>Figura 4-15:</b> Cubos desmoldados. ....	61
<b>Figura 4-16:</b> Ensayo de flujo a dosificaciones de mortero.....	62
<b>Figura 4-17:</b> Montaje ensayo de compresión en cubos de concreto. ....	63
<b>Figura 4-18:</b> Montaje para ensayo de módulo elástico del concreto.....	64
<b>Figura 4-19:</b> Ensayo de medición de velocidad de pulso ultrasónico. ....	66
<b>Figura 4-20:</b> Muestras en horno a 110 °C para obtener peso A. ....	67
<b>Figura 4-21:</b> Muestras en agua durante 48 h para obtener masa B y hervidas por 5 h para peso C. 68	
<b>Figura 4-22:</b> Peso de la muestra sumergida en agua para obtener peso D. ....	68
<b>Figura 4-23:</b> Ensayo de absorción superficial inicial (Initial Surface Absorption Test) BS 1881. 70	
<b>Figura 4-24:</b> Montaje ensayo de absorción superficial inicial. ....	70
<b>Figura 4-25:</b> Esquema del ensayo para evaluar la permeabilidad al ión cloruro.....	72
<b>Figura 4-26:</b> Montaje del ensayo para evaluar la permeabilidad al ión cloruro. ....	72
<b>Figura 5-1:</b> Resistencia a la compresión promedio de las dosificaciones de concreto (cubos). 75	
<b>Figura 5-2:</b> Resultados del módulo elástico en compresión. ....	79
<b>Figura 5-3:</b> Relación entre el módulo elástico obtenida de los cilindros y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión (K). Dosificación D1. ....	82

<b>Figura 5-4:</b>	Relación entre el módulo elástico obtenida de los cilindros y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión (K). Dosificación D2. ....	83
<b>Figura 5-5:</b>	Relación entre el módulo elástico obtenida de los cilindros y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión (K). Dosificación D3. ....	83
<b>Figura 5-6:</b>	Resultados velocidad de pulso ultrasónico. ....	84
<b>Figura 5-7:</b>	Ensayo de absorción superficial inicial – 10 minutos. ....	87
<b>Figura 5-8:</b>	Ensayo de absorción superficial inicial – 20 minutos. ....	89
<b>Figura 5-9:</b>	Ensayo de absorción superficial inicial – 30 minutos. ....	90
<b>Figura 5-10:</b>	Resultados de la permeabilidad al ión cloruro de las diferentes dosificaciones. ....	93
<b>Figura 5-11</b>	Volumen de vacíos para las diferentes edades de las dosificaciones. ....	96



## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1:</b> Composición química típica del cemento. ....	25
<b>Tabla 1-2:</b> Compuestos principales del cemento Portland [68]. ....	26
<b>Tabla 1-3</b> Composición típica calculada de los diferentes tipos de cemento Portland [69]. .....	28
<b>Tabla 1-4</b> Resistencia a compresión relativa aproximada del concreto según el tipo de cemento Portland [69]. ....	29
<b>Tabla 2-1:</b> Dosificaciones UHPC propuestas por algunos autores [67]. ....	36
<b>Tabla 2-2:</b> Esfuerzo a compresión, módulo de elasticidad y deformaciones unitarias de muestras UHPC con tratamiento de curado [40]. ....	37
<b>Tabla 4-1:</b> Caracterización química de cemento, humo de sílice, carbonato de calcio, polvo de vidrio reciclado y arena de sílice [12]. ....	46
<b>Tabla 4-2:</b> Proporción de materiales usados en dosificaciones [83]. ....	53
<b>Tabla 4-3:</b> Densidad de empaquetamiento virtual para cada material [79]. ....	55
<b>Tabla 4-4:</b> Ensayos del programa experimental. ....	61
<b>Tabla 5-1:</b> Flujo de mortero de cemento hidráulico-Dosificaciones. ....	73
<b>Tabla 5-2:</b> Densidad de empaquetamiento virtual, VPD [79]. ....	74
<b>Tabla 5-3</b> Relación entre los valores de las diferentes propiedades para cada dosificación con respecto a la muestra control – Propiedades mecánicas. ....	76
<b>Tabla 5-4</b> Análisis de varianza de la resistencia la compresión. ....	77
<b>Tabla 5-5</b> Comparación de la resistencia a compresión entre cilindros y cubos. ....	78
<b>Tabla 5-6</b> Relación entre los valores de las diferentes propiedades para cada dosificación con respecto a la muestra control – Propiedades mecánicas. ....	80
<b>Tabla 5-7</b> Análisis de varianza del módulo de elasticidad. ....	81
<b>Tabla 5-8</b> Clasificación del concreto de acuerdo con los valores de velocidad de pulso ultrasónico [27]. ....	85
<b>Tabla 5-9</b> Relación entre los valores de velocidad de pulso ultrasónico para cada dosificación con respecto a la muestra control. ....	85
<b>Tabla 5-10</b> Análisis de varianza de la velocidad de pulso ultrasónico. ....	86
<b>Tabla 5-11:</b> Anova tasa de absorción superficial inicial a 10 minutos. ....	88
<b>Tabla 5-12:</b> Anova tasa de absorción superficial inicial a 20 minutos. ....	89
<b>Tabla 5-13:</b> Anova efecto de la edad en la tasa de absorción superficial inicial. ....	91
<b>Tabla 5-14</b> Relación entre los valores de absorción superficial inicial para cada dosificación con respecto a la muestra control. ....	91
<b>Tabla 5-15:</b> Clasificación de la absorción capilar según valor de ISAT (ml/m <sup>2</sup> .s) ....	92

<b>Tabla 5-16</b> Relación entre los valores de permeabilidad de cloruros para cada dosificación con respecto a la muestra control. ....	93
<b>Tabla 5-17:</b> Anova permeabilidad al ión cloruro. ....	94
<b>Tabla 5-18:</b> Clasificación del concreto de acuerdo con el paso de coulombs, (ASTM-C1202, 2012) 95	
<b>Tabla 5-19</b> Relación entre los valores de volumen de vacíos para cada dosificación con respecto a la muestra control. ....	97
<b>Tabla 5-20</b> Anova volumen de vacíos después de inmersión y ebullición. ....	98
<b>Tabla 5-21</b> Calidad del concreto relacionada a porcentaje de vacíos. ....	98
<b>Tabla 5-22</b> Costo de las dosificaciones. ....	99
<b>Tabla 8-1</b> Resultados ensayo resistencia a compresión. ....	111
<b>Tabla 8-2</b> Resultados ensayo módulo de elasticidad. ....	112
<b>Tabla 8-3</b> Resultados promedio ensayo velocidad de pulso ultrasónico ....	113
<b>Tabla 8-4</b> Resultados promedios ensayo ISAT a 10, 20 y 30 min. ....	114
<b>Tabla 8-5</b> Resultados promedios ensayo permeabilidad a los cloruros. ....	115
<b>Tabla 8-6</b> Resultados promedios volumen de vacíos. ....	116

## Introducción

El concreto de ultra alta resistencia – Ultra High Performance Concrete (UHPC por sus siglas en inglés) es un concreto que usualmente se elabora con relaciones agua/binder entre 0.15 y 0.25, y que ofrece mejores propiedades mecánicas y de durabilidad, en comparación con el concreto de alta resistencia – High Performance Concrete (HPC por sus siglas en inglés) y el concreto de resistencia normal (NPC por sus siglas en inglés) [1]–[5]. Típicamente los concretos UHPC, contienen cemento Portland, materiales cementicios suplementarios (SCM por sus siglas en inglés), agua, aditivos reductores de agua de alto rango (HRWRA) y agregado fino [6]–[8]. Habitualmente se utiliza polvo de cuarzo para mejorar la gradación de los materiales y aumentar el empaquetamiento [9]. Por otro lado, para mejorar la adherencia de los materiales, generalmente no se utiliza agregado grueso porque tiene una menor superficie específica.

El UHPC tiene grandes ventajas en muchas aplicaciones estructurales donde los elementos son esbeltos, sin embargo, debido a las menores dimensiones de las secciones transversales de los elementos puede presentarse congestión del acero de refuerzo, por lo tanto se requiere que el material tenga una adecuada manejabilidad, alta resistencia a la compresión y durabilidad [10].

Actualmente, en el medio Latinoamericano, el UHPC presenta un elevado costo e impacto ambiental por el alto contenido en cemento y los procesos industriales que acompañan su producción, es por esto que con la finalidad de producir un concreto de forma más económica y sostenible, es importante investigar la viabilidad de producir UHPC utilizando materiales y métodos disponibles localmente en el mercado colombiano que no requieren procedimientos especiales de dosificación y curado, ni materiales costosos como el cemento, el humo de sílice o el polvo de cuarzo [9], [11], [12].

Uno de los factores que cobra gran importancia en el diseño de una dosificación UHPC es mejorar las propiedades micro y macro de la dosificación, lo que afecta tanto la durabilidad

como el rendimiento mecánico [13]. La mejora en las micro propiedades generalmente se logra proporcionando un elevado empaquetamiento de partículas [13], [14]. En UHPC, se utiliza una mayor proporción de cemento, humo de sílice y otros materiales cementicios (por ejemplo, cenizas volantes, escorias, entre otros.) en comparación con los concretos normales o de alta resistencia (NPC o HPC) además, se utiliza una baja relación agua / binder ( $a/b$ ) en el diseño de la dosificación para mejorar las propiedades mecánicas, siendo el binder el conjunto de materiales aglutinantes utilizados para sustituir o complementar parcialmente al cemento. Además estos componentes deben tener unas determinadas gradaciones de tamaño micro y nano-partícula con la finalidad de incrementar el empaquetamiento mediante el relleno de los espacios que las partículas de cemento dejan entre sí [9], [15]. Todos estos aspectos influyen directamente en la cantidad y el tamaño de la porosidad total del material. Dado que la durabilidad de los materiales cementicios está directamente relacionada con la capacidad del material para evitar la penetración de agresores perjudiciales (por ejemplo, iones de cloruro) al "refinar" la microestructura, se espera que este tipo de material exhiba una mayor durabilidad en comparación con NPC y HPC [9], [10]. Por otro lado, debido al uso cada vez mayor de UHPC, es crucial proporcionar una adecuada comprensión de cómo se comportará el material frente a condiciones de uso, y agresores a los que se verá sometido en su entorno. Investigaciones como [16], [17] han demostrado mejor comportamiento del UHPC en la resistencia a la penetración de iones de cloruro.

El costo inicial relativamente alto de UHPC ha restringido un uso más amplio en la industria de la construcción [9], sin embargo, investigadores a nivel mundial están llenando las lagunas de conocimiento para obtener UHPC empleando diferentes materiales cementicios suplementarios en sustitución parcial del cemento y del humo de sílice, reduciendo así el coste final de la dosificación. Por ejemplo, podríamos citar el caso del puente peatonal construido en la universidad de Sherbrooke donde se empleó el polvo de vidrio con varios grados de finura para reemplazar las partículas de cemento, polvo de cuarzo (QP por sus siglas en inglés), arena de cuarzo (QS por sus siglas en inglés) y humo de sílice (SF por sus siglas en inglés) [20].

---

En el caso de aplicaciones en Colombia, se realizó una investigación para el diseño de placas de concreto UHPC como solución para pisos en estaciones de tránsito, en este caso se realizó una sustitución parcial del material cementicio por carbonato de calcio [77].

Asimismo, la empresa Argos S.A, construyó el puente peatonal de la Universidad EAFIT en Medellín empleando una patente de dosificación de UHPC con el nombre comercial de Concreto Avanzado [9].

Entre las diferentes aplicaciones de UHPC en obras de infraestructura se encuentra su uso en puentes peatonales, vehiculares, rehabilitación de pavimentos, prefabricados, entre otros [9]. En los Estados Unidos, un puente en el condado de Wapello Mars Hill fue el primer puente de transporte por carretera construido con UHPC en 2006. En la cuenca de la represa de la presa Kinzua, se utilizó este material con fines de rehabilitación y reforzamiento. Además, se pueden hacer estructuras arquitectónicas y estéticamente bellas y funcionales utilizando UHPC [4], [21], [22].

Dadas las ventajas que presenta el UHPC en sus diferentes usos y con el fin de conocer y profundizar en las características de este material, se realizó el presente proyecto en el marco de la maestría en ingeniería civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería, que buscó revisar el estado del arte y las aplicaciones a nivel internacional de este material, conocer las propiedades de los materiales componentes, dosificar y caracterizar concretos UHPC con materiales locales. En tal sentido, se planteó un programa experimental que incluyó una serie de ensayos que permitiera evaluar algunas propiedades mecánicas y de durabilidad, mediante tres dosificaciones distintas de concreto tipo UHPC; donde parte del cemento y el humo de sílice han sido reemplazados parcialmente por materiales cementantes suplementarios como polvo de vidrio y carbonato cálcico y cuyas características se desglosan en el Capítulo 3. Esto permitió una comparación directa de los beneficios de estos materiales disponibles localmente junto con su repercusión en las propiedades finales del material. Las pruebas incluyeron determinación del flujo medio sin golpes (ASTM C1437), compresión en cilindros y cubos (ASTM C109), módulo de elasticidad (ASTM C469), velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C597), absorción inicial

del concreto (BS 1881-208), densidad, absorción y vacíos (ASTM C642) y permeabilidad a los cloruros (ASTM C1202).

El documento se desarrolla en seis capítulos. En el primer capítulo se describe el marco teórico, en el segundo capítulo se encuentra el estado del arte consultado sobre algunas propiedades de concretos UHPC; en el tercer capítulo se definen los objetivos generales y específicos. Posteriormente, en el cuarto capítulo se definen el programa experimental llevado a cabo, que incluye la caracterización de los materiales utilizados y la metodología empleada en el desarrollo de la investigación. En el quinto capítulo se presentan y analizan los resultados, y finalmente en el sexto capítulo se muestran las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

# 1. Marco teórico

En este capítulo se describe brevemente la evolución del concreto y algunas de las características de los materiales cementicios que se utilizan para la fabricación del UHPC. El uso de materiales cementicios es muy antiguo; los egipcios ya utilizaban yeso calcinado puro, los griegos y romanos manejaban caliza calcinada y después, aprendieron a mezclar cal con agua, arena, piedra triturada o ladrillo y tejas quebradas; éste es conocido como el primer concreto de la historia. La sílice activa y la alúmina que se encuentran en las cenizas y en las tejas se mezclan con la cal para producir lo que fue conocido como cemento puzolánico, proveniente del nombre del pueblo de Puzzuoli, cerca del Vesubio, donde se encontraron por primera vez esas cenizas volcánicas y el mismo nombre se utiliza hoy en día para describir cementos obtenidos mediante el proceso de molienda de materiales naturales a temperatura normal [69].

En la edad media disminuyó la calidad y el uso del cemento, y solamente en el siglo XVIII se encuentra un adelanto en el conocimiento de los cementos. Posteriormente, en 1756, John Smeaton encontró un cemento de mejor calidad; éste se obtenía al dosificar puzolana con caliza que contenía un alto porcentaje de material arcilloso [68]. A partir de esto, se desarrollaron otros tipos de cementos hidráulicos, como el cemento romano que obtuvo Joseph Parker por calcinación de nódulos de caliza arcillosa, que terminaron en la patente del cemento Portland efectuada en 1824 por Joseph Aspdin. Este cemento se preparaba calentando una dosificación de arcilla finamente triturada y caliza dura en un horno, hasta eliminar el  $\text{CO}_2$ , esta temperatura era menor que la necesaria para la formación de clínker, Aspdin nombró su cemento, cemento Portland debido al parecido de color y calidad entre el cemento fraguado y la piedra Portland; de esta forma se le reconoce como el inventor del cemento Portland [69].

El modelo del cemento moderno fue obtenido en 1845 por Isaac Johnson, quien quemó una dosificación de arcilla y caliza hasta la formación de clínker, con la cual se produjo la reacción necesaria para la formación de un compuesto cementicio fuerte, en sus

experimentos encontró que la temperatura de calcinación debía elevarse hasta el máximo posible, claro está, con la tecnología de la época [69].

Tomando como base los experimentos de Johnson, la fabricación del cemento Portland se inició en varias fábricas, no solo en Inglaterra, sino en Europa. La cantidad producida fue muy pequeña y únicamente cerca del año de 1900, empezó a crecer la industria del cemento, debido a dos factores: a) Experimentos realizados por los franceses Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaelis, con los cuales se produjo cemento de calidad uniforme de modo que pudiera ser usado en la industria de la construcción y b) Dos invenciones mecánicas muy importantes los hornos rotarios para la calcinación y el molino tubular para la molienda, de esta forma pudo entonces producirse el cemento Portland en cantidades comerciales, induciendo así un crecimiento de la industria acelerado [69].

## **1.1 Cemento**

Es un material pulverizado que además de óxido de calcio contiene: sílice, alúmina y óxido de hierro y que forma, por adición de agua, una pasta aglomerante capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire. Se excluyen las cales hidráulicas, cales aéreas y yesos [69].

## **1.2 Cemento Portland**

Se obtiene por la pulverización del clínker Portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio. Se pueden adicionar otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Las adiciones deben ser pulverizadas conjuntamente con el clínker [69].

### **1.2.1 Fabricación del cemento Portland**

El cemento Portland se compone principalmente por materiales calcáreos tales como caliza, alúmina y sílice que se encuentran como arcilla o pizarra y en los últimos años la



adición de material puzolánico, que puede ser en estado natural como tierra de diatomeas, rocas opalinas, esquistos, cenizas volcánicas, o material calcinado de tipo artificial (óxido de silicio precipitado y cenizas volantes) [69].

Su proceso de fabricación consiste en triturar finamente la materia prima, mezclarla cuidadosamente en una cierta proporción y calcinarla en un horno rotatorio de gran tamaño, a una temperatura de 1300 a 1400 °C, a la cual el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como clínker. El clínker se enfría y a continuación, se adiciona un poco de yeso y en los últimos años se le agrega material puzolánico, que se tritura hasta obtener un polvo fino; el producto comercial resultante es el cemento Portland [69].

La dosificación y la trituración de materias primas pueden elaborarse tanto en húmedo como en seco, de donde provienen los nombres de los procesos. El método de fabricación a seguir depende de la naturaleza de las materias primas usadas y de factores económicos [69].

## 1.2.2 Composición química del cemento Portland

Las materias primas utilizadas en la fabricación de cemento Portland contienen principalmente cal, sílice, alúmina y hierro, ver Tabla 1-1.

**Tabla 1-1:** Composición química típica del cemento.

Componente químico	Nombre del componente	% en el cemento
LOI	Pérdida por calcinación	3.53
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silicio	20.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alúmina	4.78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de hierro	3.31
CaO	Óxido de calcio	63.63
MgO	Óxido de magnesio	0.87
SO <sub>3</sub>	Óxido de azufre	2.34
NaO <sub>2</sub>	Óxido de sodio	0.13
K <sub>2</sub> O	Óxido de potasio	0.76

<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de cromo	0.02
<b>MnO</b>	Óxido de manganeso	0.04
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	Óxido de fósforo	0.27
<b>TiO<sub>2</sub></b>	Óxido de titanio	0.30

Estos compuestos reaccionan en el horno, para formar una serie de productos más complejos, hasta alcanzar a equilibrarse químicamente.

Se suelen considerar cuatro compuestos como los componentes principales del cemento; se enumeran en la Tabla 1-2, junto con sus símbolos de abreviación [69].



Análogamente, el H<sub>2</sub>O del cemento hidratado se indica por una H.

**Tabla 1-2:** Compuestos principales del cemento Portland [68].

Nombre del Compuesto	Fórmula	Abreviatura
<b>Silicato dicálcico</b>	2CaO . SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
<b>Silicato tricálcico</b>	3CaO . SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
<b>Aluminato tricálcico</b>	3CaO . Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
<b>Aluminoferrito tetracálcico</b>	4CaO . Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Estos compuestos sirven para:

El silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S) endurece de forma lenta y ayuda en gran parte al aumento de resistencia a edades superiores de una semana; se considera que a los 180 días solo ha reaccionado aproximadamente un 50% [69].

El silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) endurece rápidamente y es el factor principal del fraguado inicial y del rápido endurecimiento. En general, la resistencia prematura (durante el primer mes) del cemento es mayor al aumentar los porcentajes de C<sub>3</sub>S [69].

El aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) libera una gran cantidad de calor en los primeros días de endurecimiento, en la primera semana se hidrata casi completamente contribuyendo levemente con la resistencia temprana. Su principal función es ayudar la reacción de la sílice con la cal. Los cementos con un bajo contenido de  $C_3A$  son principalmente resistentes al suelo y agua que contenga sulfatos [69].

La formación del aluminoferrito tetracálcico ( $C_4AF$ ) disminuye la temperatura de calcinación en el horno rotatorio, ayudando, por tanto, a la fabricación del cemento. Se hidrata rápidamente (a los tres días casi en su totalidad), pero contribuye poco a la resistencia [69].

Fuera de los compuestos principales citados en la tabla 1-2, existen otros compuestos menores como:  $MgO$ ,  $TiO_2$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $K_2O$  y  $Na_2O$ , que generalmente no sobrepasan de un pequeño porcentaje del peso del cemento [69].

Dos de los componentes menores importantes son: los óxidos de sodio y potasio,  $Na_2O$  y  $K_2O$ , conocidos como álcalis. Se ha encontrado que estos componentes reaccionan con algunos agregados y que los productos de esa reacción ocasionan una descomposición del concreto, además de afectar la rapidez con que el cemento obtiene resistencia. Debido a esto, se debe destacar que el término compuesto menor se refiere principalmente a la cantidad, pero no necesariamente a su importancia [69].

### **1.2.3 Tipos de cemento Portland**

A medida que varían los contenidos de  $C_2S$ ,  $C_3S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  cambian las propiedades del cemento Portland, por lo tanto se pueden fabricar otros tipos con el fin de satisfacer ciertas propiedades físicas y químicas para situaciones específicas [69].

CEMENTO PORTLAND TIPO 1: Está destinado a obras de concreto en general, al que no se le exigen propiedades especiales.

CEMENTO PORTLAND TIPO 1-M: Está destinado a obras de concreto en general, al que no se le exigen propiedades especiales, pero tiene resistencias superiores a las del tipo 1.

CEMENTO PORTLAND TIPO 2: Está destinado en general a obras de concreto expuestas a la acción moderada de sulfatos y a obras donde se requiera moderado calor de hidratación.

CEMENTO PORTLAND TIPO 3: Desarrolla altas resistencias iniciales.

CEMENTO PORTLAND TIPO 4: Desarrolla bajo calor de hidratación.

CEMENTO PORTLAND TIPO 5: Ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.

CEMENTO PORTLAND CON INCORPORADORES DE AIRE: Son aquellos a los que se les agrega un material incorporador de aire durante la pulverización; para identificarlos se les coloca una letra A así por ejemplo cemento Portland tipo 1-A o tipo 3-A, entre otros.

CEMENTO PORTLAND BLANCO: Es el que se obtiene con materiales debidamente escogidos que le confieren un color blanco; prácticamente cumple las especificaciones del cemento Portland tipo 1 (NTC 1362).

**Tabla 1-3** Composición típica calculada de los diferentes tipos de cemento Portland [69].

Tipos de Cemento Portland	Composición (%)			
	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
1 - Normal	24	50	11	8
2 - Moderado	33	42	5	13
3 - Alta resistencia inicial	13	60	12	8
4 - Bajo calor de hidratación	50	26	5	12
5 - Resistencia a los sulfatos	40	40	4	9

La resistencia a compresión de los concretos hechos con los diferentes tipos de cemento Portland, tomando como base para la comparación el cemento Portland tipo 1, se muestra en la tabla 1-4 [69].

**Tabla 1-4** Resistencia a compresión relativa aproximada del concreto según el tipo de cemento Portland [69].

Tipos de Cemento Portland	% Resistencia a la compresión			
	1 DIA	7 DIAS	28 DIAS	3 MESES
1 - Normal	100	100	100	100
2 - Moderado	75	85	90	100
3 - Alta resistencia inicial	190	120	110	100
4 - Bajo calor de hidratación	55	55	75	100
5 - Resistencia a los sulfatos	65	75	85	100

### 1.3 Humo de sílice

El humo de sílice (o microsílíce) es un producto inorgánico constituido por partículas esféricas de gran finura que se origina en la reducción del cuarzo con carbón, durante los procesos de obtención de silicio metal y ferrosilicio en hornos eléctricos de arco. El Humo de sílice se forma cuando el gas de SiO del cuarzo, se mezclan con el oxígeno que existe en la parte superior del horno, se oxida y se forma el dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), condensándose en las partículas esféricas que conforman el humo de sílice [27], [63]. El humo de sílice consiste en partículas esféricas muy finas con una superficie específica del orden de 20.000 m<sup>2</sup>/kg. La distribución del tamaño de las partículas de un humo de sílice típico indica que la mayoría de las mismas son menores a 1 μm, con un diámetro promedio de casi 0.1 μm, que es menor casi cien veces a la partícula promedio de cemento, regidas por las normas ASTM C1240 y el ACI 234R [27].

El porcentaje de peso en los materiales cementantes varía entre el 5% y 12%. Por otro lado, gracias al tamaño de las partículas, el humo de sílice trabaja también como un llenante (filler), generando un efecto de micro relleno que provoca cambios significativos en la microestructura del concreto, mejorando la adherencia y la manejabilidad que

favorece el llenado los vacíos existentes entre los materiales, lo cual reduce su permeabilidad y favorece sus propiedades mecánicas [27].

## 1.4 Carbonato de calcio

El carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es un mineral muy común que se puede encontrar en abundantes masas dentro de la corteza terrestre y otros entornos geológicos. Existe en todas partes del mundo y en las tres clasificaciones de rocas. El carbonato de calcio lo contiene comúnmente la piedra caliza al ser esta triturada en su forma pura, aunque también se encuentra naturalmente como tiza, mármol, aragonita y calcita [72].

Por medio de estas adiciones minerales de extrema finura y químicamente reactivas, se logran llenar los micro vacíos del empaquetamiento granular conformado por agregados y cemento, mejorando la compacidad del material y a la vez, las propiedades de la dosificación fresca. Por lo tanto, la cantidad de agua puede ser reducida con el fin de mejorar la resistencia del concreto. Por otra parte, estas adiciones reaccionan a mediano y largo plazo con el hidróxido de calcio producido en la hidratación del cemento Portland, dando como resultado compuestos de mucha mayor resistencia [71].

## 1.5 Polvo de vidrio

El vidrio es un material sólido que generalmente se compone de sílice no cristalina, óxido de sodio, óxido de calcio y otros componentes. Siendo amorfo y conteniendo cantidades relativamente grandes de silicio, el vidrio puede ser un excelente material puzolánico para la industria del concreto. Cuando el vidrio está finamente molido hasta su reducción a polvo, puede utilizarse como sustitución parcial del cemento [70].

## 1.6 Arena silícea

Es un compuesto resultante de la dosificación de sílice con oxígeno. Su composición química se forma por un átomo de sílice y dos átomos de oxígeno, creando una molécula

estable de  $\text{SiO}_2$  [73], utilizada industrialmente por sus importantes propiedades físicas y químicas, destacándose la dureza, resistencia química, alto punto de fusión, piezoelectricidad, piroelectricidad y transparencia [73].

Es la materia prima fundamental para la fabricación del vidrio, aproximadamente el 70 % de su composición es de sílice y de porcelana. También es utilizada especialmente como lecho filtrante para depuración y potabilización de las aguas (para la retención de los flóculos de tamaños muy pequeños que no son separados por decantación), y por su dureza son utilizados para la fabricación de lejías, abrasivos industriales y arenados [73].

## **1.7 Aditivos superplastificantes de alto rango**

Los aditivos reductores de agua de alto rango (HRWRA por sus siglas en inglés) se usan para mejorar la trabajabilidad del concreto, y es especialmente crítico para concreto con relación agua/binder muy baja. Los HRWRA a base de formaldehído con lignosulfato, le producen a la dosificación una pérdida de asentamiento que se vuelve significativo cuando la relación agua/binder es muy baja [74].

El HRWRA a base de policarboxilato es el tipo más nuevo de HRWRA que es más eficiente para mejorar y mantener la trabajabilidad del concreto fresco incluso con relaciones agua/binder por debajo de 0.25 [74]. Varios estudios se han centrado en modificar la estructura molecular para producir HRWRA altamente eficiente [74]. Por otro lado, al seleccionar productos comerciales basados en policarboxilato, su peso molecular promedio se convierte en una de las características importantes. Generalmente, cuanto mayor es el peso molecular promedio, mejor se desempeña el HRWRA [74]. Otros problemas, como el retardo de fraguado severo y el desarrollo lento de resistencia a la compresión del concreto, pueden ocurrir debido a una sobredosis de HRWRA [74]. Por lo tanto, siempre es importante identificar un rango óptimo de dosis de HRWRA para un tipo específico de cemento y de material cementante para un propósito de aplicación estructural.

## 2. Estado del arte

### 2.1 Concreto de ultra altas prestaciones (UHPC)

El Concreto de ultra altas prestaciones más conocido en la bibliografía internacional como (UHPC o UHPFRC por sus siglas en inglés), dependiendo del uso o no de fibras en su dosificación, combina estas tres propiedades del concreto: alta resistencia, durabilidad y autocompactabilidad [28].

Su definición se asocia a concretos con resistencia característica superior a 150 MPa, alto contenido de cemento y elevada compacidad (empaquetamiento de partículas) que le confiere una muy alta durabilidad [28]. Anteriormente se denominaba UHSC (Ultra High Strength Concrete), pero el primer término es más aceptado actualmente debido a las propiedades adicionales que posee además de la resistencia a compresión.

La AFGC (Asociación Francesa de Ingenieros Civiles) en su recomendación “Bétons fibrés á ultra-hautes performances” (2013) [29], define el material como aquél con resistencia a compresión superior a 150 MPa, elevada resistencia a flexo-tracción y un comportamiento muy dúctil.

El ACI 239R, define al UHPC como: “un concreto con resistencia a la compresión igual o superior a los 150 MPa y con condiciones especiales en cuanto a durabilidad y ductilidad” [30].

A su vez, la recomendación Francesa de Ultra High Performance Concrete lo define como "Ultra High Performance Concrete Reinforced Fibers "se refiere a materiales con una matriz cemento y una resistencia a la compresión característica superior a 150 MPa, un máximo de 250 MPa y un contenido de fibras de acero con el fin de lograr un comportamiento dúctil [29]. También pueden contener fibras poliméricas [31].



Haciendo un recuento de la historia del concreto, es evidente que este ha experimentado una continua evolución a lo largo de toda su existencia, que ha ido presentando variaciones de acuerdo con las circunstancias locales, el tiempo y el conocimiento.

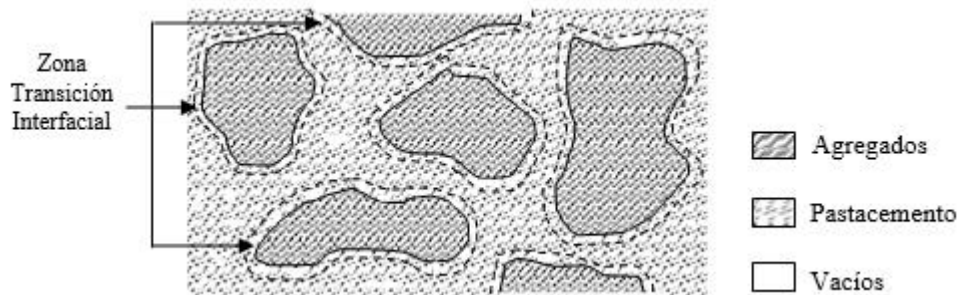
En la década de 1960 aparecen los concretos reforzados con fibras, en los años 70' aparecen los concretos de alta resistencia con una capacidad de soportar a compresión esfuerzos de 120 a 200 MPa, y por último a finales de los años 80 aparece el concreto autocompactante, con el cual se consiguen un conjunto de Concretos especiales capaces de adaptarse a diferentes tipos de ambientes y con capacidad de trabajar para un cierto tipo de diseño. El UHPC se puede decir que es una combinación de estos tres concretos especiales [32].

Debido a las excelentes propiedades mecánicas del UHPC, es posible tener estructuras más livianas y con tramos largos, estructuras híbridas, nuevos diseños y nuevos productos con un potencial para una mejor economía y consumo menor de recursos comparado con estructuras elaboradas con concreto de resistencia normal (NPC por sus siglas en inglés) o concreto de alta resistencia (HPC por sus siglas en inglés) [1], [9], [26].

En comparación con las dosificaciones de concreto normales, la matriz de UHPC es mucho más densa. Para fabricar este tipo de concreto, es importante alcanzar la máxima densidad combinando adecuadamente todos los componentes de la dosificación (optimización de empaquetamiento) [13], [33]. De acuerdo con la referencia [30], los concretos UHPC tienen varias veces más resistencia, módulo elástico, tenacidad a la fractura, ductilidad y durabilidad comparado con un concreto normal. El UHPC se prepara dosificando grandes cantidades de cemento y humo de sílice con arena fina de cuarzo y polvo de cuarzo entre otros materiales. La relación agua/binder se mantiene muy baja, por lo tanto, se necesita una dosis alta de superplastificantes para mantener la fluidez requerida. Por otro lado, la necesidad de arena fina de cuarzo y polvo de cuarzo para producir dosificaciones de UHPC aumenta su costo en lugares donde estos componentes no están disponibles de forma natural [9]. En la práctica, el concreto con una resistencia a la compresión menor que 50 MPa es considerado como concreto de resistencia normal. Por otro lado, los materiales

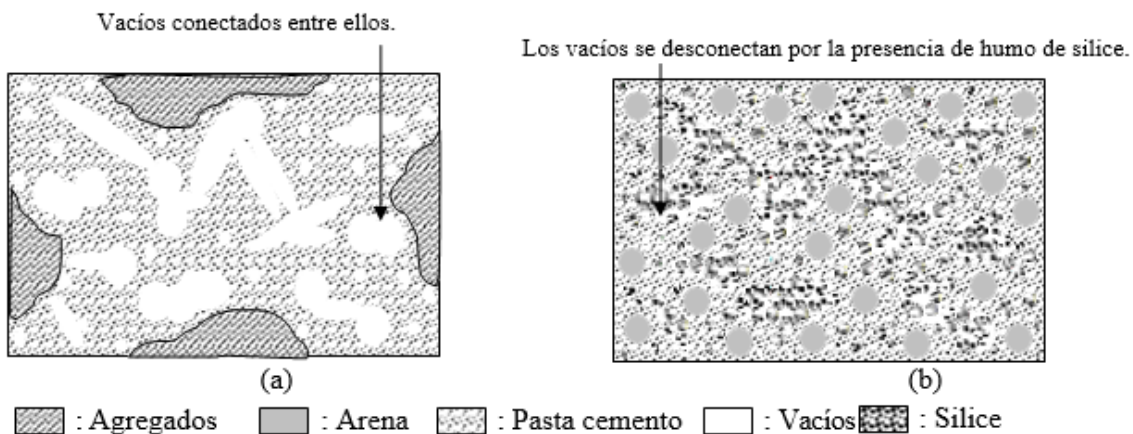
componentes de este concreto son relativamente simples, consisten en cemento, agregado y agua. La Figura 2-1 muestra la microestructura de NPC [34].

**Figura 2-1:** Microestructura de NPC [34].



Mientras que el concreto de alta resistencia (HPC), puede definirse como aquel que tiene una resistencia a la compresión mayor o igual a 50 MPa. Por otro lado, los concretos de resistencia a la compresión de más de 150 MPa se definen como de muy alta resistencia (UHPC por sus siglas en inglés). La Figura 2-2 muestra la microestructura de HPC y UHPC respectivamente.

**Figura 2-2:** Microestructura de HPC (a) y UHPC (b) [34]



De lo anterior se infiere que, con el fin de mejorar la resistencia del concreto, es necesario optimizar los factores que inciden en ella. Para esto se consideran tres aspectos: (a) la pasta de cemento hidratado debe reforzarse, (b) la porosidad en el concreto se debe

reducir, y (c) la zona de transición interfacial (ITZ por sus siglas en inglés) debe ser reducida. [34]

En primer lugar, la pasta de cemento hidratado se puede reforzar reduciendo la porosidad de gel dentro de la pasta, mediante empleo de adiciones adecuadas (por ejemplo, humo de sílice). En segundo lugar, la porosidad en el concreto se puede disminuir mediante la adición de materiales adecuados, que pueden llenar el espacio vacío en el interior del concreto, como sería el caso del uso de harina de cuarzo o cenizas volantes para rellenar los vacíos entre las partículas de arena y cemento. Con dichas adiciones se logra que la conectividad de los poros se reduzca debido a que las partículas muy finas bloquean eficazmente la red capilar como se mostró en la Figura 2-2. En tercer lugar, la zona de transición de la interfaz puede disminuirse mediante la reducción de la relación agua/binder y mejorando el empaquetamiento de las partículas en esta zona. Por otro lado, los superplastificantes se incorporan a la dosificación de concreto para lograr una adecuada manejabilidad, cuando se tienen muy bajas relaciones agua/binder (menos de 0.2) que permiten favorecer la resistencia a compresión [35], [36].

Como ya se mencionó, El UHPC tiene una estructura de poros discontinua que reduce la entrada de líquidos, mejorando significativamente las propiedades mecánicas y de durabilidad, comparado con concretos convencionales de alto desempeño [37]. Adicionalmente, para la fabricación de UHPC [38] se proponen las siguientes recomendaciones:

- El agregado grueso debe ser eliminado para mejorar la homogeneidad del concreto.
- Inclusión de fibras de acero para mejorar la ductilidad de los concretos.
- Uso de súper plastificantes y grandes cantidades de agregado superfino añadidos con humo de sílice y cuarzo, para lograr una baja relación agua/binder lo cual reduce la porosidad y mejora la resistencia a la compresión.
- Curado con vapor para obtener una mayor resistencia.

En la Tabla 2-1 se muestran algunas dosificaciones propuestas por diferentes autores: (Ranade, Li, Stults, Heard, & Rushing, 2013), (Habel, Viviani, Denarié, & Brühwiler, 2006), (Wang, Yang, Liu, Wan, & Pu, 2012) [67].

**Tabla 2-1:** Dosificaciones UHPC propuestas por algunos autores [67].

Material	Ranade, Li, Stults, Heard, and Rushing	Habel, Viviani, Denarié, and Bruhwiler	Wang. Yan, Liu, Wan. and. Pu
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
<b>Cemento</b>	907	1050	810
<b>Humo de sílice</b>	353	275	90
<b>Arena Silíceea</b>	635	730	616
<b>Agua</b>	189	190	162
<b>HRWRA</b>	16	35	18
<b>Fibras</b>	190	470	200

De la Tabla 2-1 se puede identificar que el contenido de cemento de todas las dosificaciones se encuentra por encima de 800 kg/m<sup>3</sup> y que excepto la dosificación de Wang, Yan, Liu, Wan y Pu todas tienen un alto contenido de humo de sílice, es decir, el costo de estas dos primeras dosificaciones es más elevado.

## 2.2 Antecedentes para propiedades mecánicas

### 2.2.1 Resistencia a la Compresión

En [40] se realizó una investigación para encontrar dos propiedades mecánicas del material, resistencia a compresión y módulo de elasticidad. Encontrando que un UHPC con sustitución parcial de cemento por humo de sílice y curado normal, se obtiene una resistencia a la compresión superior a 150 MPa y un módulo de elasticidad levemente superior al rango estipulado en la tabla 2-2 del ACI239 (40-50 GPa), lo cual es significativamente alto en comparación con el concreto convencional o HPC. A continuación en la Tabla 2-2 se muestra la deformación última, que como ya se mencionó

es sólo ligeramente superior a la que normalmente se esperaría para el concreto convencional [40].

**Tabla 2-2:** Esfuerzo a compresión, módulo de elasticidad y deformaciones unitarias de muestras UHPC con tratamiento de curado [40].

Tiempo de ensayo (días)	Esfuerzo a la compresión MPa (ksi)			Módulo de elasticidad GPa (ksi)			Deformaciones unitarias		
	Número de cilindros	Promedio	Desviación estandar*	Número de cilindros	Promedio	Desviación estandar*	Número de cilindros	Promedio	Desviación estandar*
<b>Con curado</b>									
1	5	26.9 (3.9)	2.7 (0.36)	5	19.4 (278)	1.9 (278)	5	0.0068	0.0008
5	5	185 (26.8)	6.2 (0.92)	5	52.4 (7600)	0.8 (109)	4	0.0041	0.0005
15	6	193 (28.0)	5.5 (0.75)	6	52.5 (7620)	1.1 (162)	4	0.004	0.0003
30	6	200 (28.9)	6.9 (0.97)	6	51.4 (7460)	1.2 (167)	4	0.0046	0.0003
55	6	194 (28.1)	8.3 (1.20)	6	52.5 (7610)	0.7 (99)	4	0.0039	0.0003

Por otro lado, la investigación desarrollada por [75], exploró la posibilidad de producir dosificaciones de UHPC mediante la sustitución parcial de cemento por material cementicio tales como: humo de sílice, puzolana natural, cenizas volantes, polvo de piedra caliza, polvo de horno de cemento y escoria de alto horno pulverizado, disponibles localmente. Los resultados fueron útiles para producir dosificaciones de UHPC en industrias de concreto con una gama más amplia de opciones con respecto al uso de materias primas fácilmente disponibles y cumplir con los requisitos de resistencia y durabilidad previstos. En esta investigación se ensayaron cubos de 50 mm x 50 mm x 50 mm de acuerdo con ASTM C109 y se encontraron resistencias a compresión entre 150-160 MPa [75].

En la investigación de [11] se elaboró una dosificación de concreto donde se buscaba reemplazar el material cementicio por polvo de cuarzo y humo de sílice con el objetivo de obtener concreto UHPC como una solución viable y a largo plazo para una construcción sostenible y mejorada debido a sus propiedades de ultra alta resistencia y durabilidad. Las muestras investigadas incluyeron tres tipos de muestras cilíndricas con dimensiones de 50 mm, 75 mm, 100 mm de diámetro y 100 mm, 150 mm y 200 mm de longitud,

respectivamente, y muestras cúbicas con 50 mm de lados. Se encontró que los cilindros con diferentes diámetros parecían tener una resistencia a la compresión similar, pero los cubos tenían resistencias a la compresión aproximadamente 5% más altas que la de los cilindros.

De acuerdo con los resultados de los ensayos de compresión realizados en cinco dosificaciones con cemento, arena, humo de sílice, superplastificante y agua realizados en [73], sobre 12 cubos de 50x50x50 mm a edades de 3, 7, 14 y 28 días de curado mediante saturación en agua, se encontró que la resistencia a la compresión alcanzó los 161 MPa a los 28 días. También se encontró que la resistencia a los 3, 7 y 14 días fue aproximadamente 70, 80 y 85% de la resistencia a los 28 días. Alcanzar el 70% de la resistencia en los primeros tres días muestra un desarrollo de la resistencia de UHPC más rápido que el concreto normal, el cual tarda 7 días en alcanzar el 70% de la resistencia a los 28 días [73].

### **2.2.2 Módulo de elasticidad**

En la investigación [6] se ensayaron muestras de acuerdo con ASTM C469 para 7 dosificaciones de UHPC donde se reemplazó parcialmente el cemento con humo de sílice y polvo de vidrio con tamaño medio de partícula de 75  $\mu\text{m}$ , en diferentes proporciones. La relación agua/binder estuvo entre 0.19 y 0.25. Los ensayos se hicieron a 28 y 90 días, y se obtuvieron módulos de elasticidad entre 41 y 45 GPa. Como principales conclusiones se encontró que las dosificaciones exhibieron una excelente trabajabilidad con una microestructura mejorada y módulo de elasticidad más alto comparado al de un UHPC convencional.

En [11] se evaluó el módulo de elasticidad para 9 dosificaciones de UHPC con proporción agua/binder de 0.22, donde el reemplazo parcial de cemento incluyó humo de sílice y ceniza volante entre otros y una dosificación de control sin reemplazo de material cementante. El ensayo se realizó en 3 muestras cilíndricas de diámetro de 100 mm y altura de 200 mm por cada dosificación. El módulo de elasticidad encontrado fue de alrededor de 50 GPa en promedio a la edad de 28 días. De acuerdo con los resultados se tuvo que

las dosificaciones con adición de humo de sílice tuvieron aumento en el módulo de elasticidad del 9% comparadas con la que no tenía humo de sílice como sustituto parcial de cemento.

### **2.2.3 Velocidad de pulso ultrasónico**

En la investigación [76] se realizó la prueba de velocidad del pulso ultrasónico en cubos de 50x50x50 mm, con tres dosificaciones de concreto a las que se le sustituyó parcialmente el material cementicio por humo sílice. Se observó que la velocidad de pulso del concreto para una dosificación con adición del 7.5% de humo de sílice fue 5780 m/s y para una dosificación adicionando el 5% de humo de sílice fue 5494 m/s este rango está dentro de la categoría de excelente indicando concreto de mayor compacidad.

## **2.3 Antecedentes para Durabilidad**

Las investigaciones llevadas a cabo en relación a la durabilidad del concreto típico han identificado que la mayoría de los problemas de durabilidad están relacionados con la permeabilidad del concreto a la acción del agua, los líquidos y los gases, volumen de vacíos y los iones químicos. Tales problemas influyen en la corrosión del refuerzo de acero, daño en la masa del concreto por ciclos de congelación-descongelación del concreto y reacción de sílice alcalina que produce degradaciones en el concreto [12].

La permeabilidad del concreto es un factor clave que influye en la durabilidad ya que depende de la permeabilidad de cada material que lo constituye y su disposición geométrica. La permeabilidad de la pasta de cemento está relacionada principalmente con la estructura de los poros, que incluye la porosidad, el tamaño de los poros y la conectividad; mientras que la estructura de los poros es una función de la relación agua/binder y el grado de hidratación [12].

Los agregados tienen una permeabilidad mucho menor que la pasta de cemento. Sin embargo, afectan la permeabilidad del concreto, por lo cual se infiere que para lograr un concreto duradero debe mejorarse el empaquetamiento de partículas, en los resultados de

[31] se indica que una disminución en la relación agua/binder está acompañada de una menor porosidad. Una disminución en la porosidad significa que hay una disminución en el tamaño de los poros y una desconexión entre ellos; en consecuencia, la permeabilidad del concreto disminuye. La adición de materiales minerales, especialmente el humo de sílice, puede mejorar tanto la estructura de los poros como la zona de transición interfacial [1]. Por otro lado, el UHPC puede no ser duradero debido al agrietamiento por contracción a temprana edad por la gran masa de cemento que se necesita para lograr las resistencias de diseño deseadas. Por lo tanto, además de una buena dosificación de concreto y del uso de adiciones cementicias, debe enfatizarse en las buenas prácticas constructivas, incluido un buen curado, factor determinante para producir concreto duradero [1].

### **2.3.1 Porcentaje de vacíos en concreto endurecido**

En la investigación de [11], se elaboraron 9 dosificaciones con diferente proporción de humo de sílice densificado (SFU por sus siglas en inglés) y harina de sílice (SFL por sus siglas en inglés) para estudiar el efecto de esta combinación, y una dosificación de control sin adición de SFU y SFL, la relación agua /binder se mantuvo en 0.22. Se evaluaron cilindros de 100x200mm a 28 días y se encontró que la influencia de la sustitución parcial de material cementicio por humo de sílice densificado y harina de sílice en el volumen de vacíos permeables de la muestra de concreto fue significativa. La adición de SFU, disminuyó el volumen de vacíos permeables de concreto en un 38% si se compara con un concreto sin adición de SFU. Esto se atribuyó al efecto de relleno y efecto puzolánico de SFU, que densificó la microestructura del concreto [11]. Así mismo la sustitución parcial del material cementicio por SFL redujo en un 20% el volumen de vacíos permeables, si se compara con un concreto sin adición de SFL.

Por otro lado, también se encontró que, en los resultados de [75] se tomó una dosificación de referencia de UHPC con humo de sílice como reemplazo parcial de material cementicio y 8 dosificaciones de prueba de UHPC donde se reemplazan parcialmente los materiales cementantes por humo de sílice, ceniza volante y puzolanas, entre otros. Se elaboraron cilindros de 75x150mm por dosificación sobre los cuales se evaluó la absorción, de acuerdo con ASTM C642, la tendencia indica que la absorción va disminuyendo con los



días de curado y se obtuvieron absorciones inferiores al 1% para dosificaciones a 28 días, lo que indica que la baja absorción para las diferentes probetas en todas las edades de ensayo, se atribuye al menor tamaño de partículas, modificando así la microestructura del concreto y al efecto del curado que contribuye a mejorar la hidratación del cemento y las reacciones puzolánicas, creando una microestructura más densa, con un menor volumen de poros capilares disminuyendo así la permeabilidad [75].

### **2.3.2 Absorción superficial inicial**

Asimismo en los estudios de durabilidad de [73], se tuvo que para 5 dosificaciones que sustituían parcialmente material cementante por humo de sílice con relación agua/binder entre 0.18 y 0.22, ensayando 3 cilindros por dosificación de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura de acuerdo con BS 1881, a edad de 28 días, se encontró que la absorción promedio de agua fue de 0.43% alrededor de menos de diez veces en comparación con el concreto de alta resistencia. Esto indica que la dosificación desarrollada tiene una microestructura muy densa, lo que ha resultado en una absorción de agua insignificante y permeabilidad al agua despreciable.

### **2.3.3 Permeabilidad al ión cloruro.**

De acuerdo con la investigación adelantada por [75], en las dosificaciones empleadas se realizó una sustitución parcial de material cementicio, por materiales tales como: humo de sílice, puzolana natural, cenizas volantes, carbonato de calcio, polvo de horno de cemento y escoria de acero pulverizado, disponibles localmente. Se elaboraron 7 dosificaciones sobre las cuales se realizó el ensayo de permeabilidad al ión cluro de acuerdo con ASTM C1202 sobre cilindros de 100x200 mm, se obtuvieron valores de carga que pasa menores a 100 Coulombs que de acuerdo con ASTM 1202 es indicador de carga que pasa muy baja o insignificante.

## 2.4 Aspectos relacionados con el costo e impacto ambiental del UHPC

Generalmente, el costo del UHPC es más alto que el de NPC y HPC debido a su alto contenido de cemento, si se compara el costo de UHPC por unidad de volumen en Europa y América del Norte. En América del Norte, el costo de UHPC es más alto que el de Europa debido a su uso limitado. La aplicación de UHPC puede resultar en una construcción más sostenible debido a posibles impactos económicos, sociales y ambientales.

De igual manera, el costo total de las estructuras está directamente relacionado con las dimensiones transversales de los elementos estructurales. El uso de miembros estructurales de UHPC ayudaría a reducir las dimensiones transversales [9], liberando así espacio útil adicional en los edificios. De otro lado, el costo del material también se puede reducir en comparación con el de un elemento de NPC de sección transversal más grande, a pesar de que el contenido de cemento requerido en UHPC es mayor.

Además, la cantidad de agregados finos se puede reducir al 30%, mientras que no se utiliza agregado grueso en UHPC [53]. En la investigación de [54], se concluye que se puede lograr una reducción de aproximadamente el 56% en los costos de materiales utilizando UHPC en lugar de NPC. Esto también puede resultar en una disminución de los residuos de demolición, lo que lleva a una menor demanda de transporte y, en consecuencia, menores efectos sobre el medio ambiente [55].

Igualmente, la utilización de subproductos como cenizas volantes, polvo de vidrio o humo de sílice como reemplazo parcial de cemento hace que el UHPC sea más sostenible [56]. Por otro lado, desde el punto de vista de vida útil, se puede lograr que los elementos de UHPC requieran un menor costo de mantenimiento debido a sus características mejoradas de durabilidad; y, por lo tanto, su costo puede reducirse ya que se tiene un tiempo en servicio mucho más largo [54]. Así mismo el mantenimiento es menor y menos invasivo, lo que llevaría a un efecto social positivo; igualmente el UHPC impacta favorablemente, dado que su efecto sobre la capa de ozono es menor, se tiene menos potencial de deterioro del

medio ambiente y menos emisiones de gases de efecto invernadero; constatado en el estudio reportado por [57] donde concluyeron que la utilización de UHPC brinda como resultado una reducción de energía del 50% en comparación con la de NPC. En resumen, el UHPC puede ser un material sostenible debido a su durabilidad mejorada, factores ecológicos, beneficios económicos y su capacidad de reciclaje en diversas aplicaciones, tal como reporta [5].

Basados entonces en las características de los materiales componentes de los UHPC y la evaluación de la viabilidad de poderlos elaborar con componentes locales del medio colombiano, se propuso el presente trabajo de investigación, las dosificaciones empleadas son producto de la optimización de dosificaciones de UHPC. Se propuso un programa experimental teniendo unas determinadas dosificaciones y reemplazando parcialmente el cemento y el humo de sílice por polvo de vidrio y carbonato de calcio.

## **3. Objetivos**

### **3.1 Objetivo General**

Evaluar propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos de ultra altas prestaciones (UHPC), con diferentes materiales cementantes suplementarios.

### **3.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar experimentalmente y apoyados en análisis de la varianza (ANOVA), el comportamiento en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los UHPC adicionados con polvo de vidrio reciclado y carbonato cálcico.
  
- Realizar un estudio comparativo entre dosificaciones con diferentes materiales cementantes suplementarios teniendo en cuenta propiedades mecánicas y de durabilidad.
  
- Seleccionar la dosificación con materiales cementantes suplementarios más adecuada desde el punto de vista de propiedades mecánicas y de durabilidad.
  
- Comparar costos por unidad de volumen de las tres dosificaciones bajo estudio.

## 4. Programa experimental

El proyecto de investigación se divide en tres etapas. En la primera etapa se realizó la consecución de los materiales a emplear en la elaboración de los concretos deseados. En la segunda etapa se definieron las dosificaciones a evaluar. En la tercera etapa se desarrolló un programa experimental que incluyó la elaboración de las dosificaciones de concreto, mediciones de propiedades en estado fresco, elaboración y curado de probetas y posteriormente los ensayos a diferentes edades para evaluar las propiedades mecánicas y de durabilidad mediante ensayos al concreto endurecido. Se evaluó la resistencia a la compresión, absorción superficial, densidad y masas unitarias, penetración al ion cloruro, velocidad de pulso ultrasónico y módulo de elasticidad en ambiente y temperatura controlada.

A continuación, se presentan los diferentes materiales seleccionados para el correspondiente estudio.

### 4.1 Materiales

Los materiales utilizados para la elaboración de las dosificaciones estaban disponibles localmente en Colombia. En la Tabla 4-1 se presenta la composición química de los materiales cementantes usados, donde se observa que la densidad del cemento es de  $3.16 \text{ g/cm}^3$ , característica de los cementos “casi puros”, del medio colombiano; el humo de sílice está compuesto en más del 90% por sílice amorfa, el carbonato cálcico tiene una pérdida por ignición muy alta y contenido de carbonato cálcico elevado, el polvo de vidrio es predominantemente silíceo con una pequeña composición de carbonato cercano al 10% y la arena silícea en más del 90% compuesta por sílice [12].

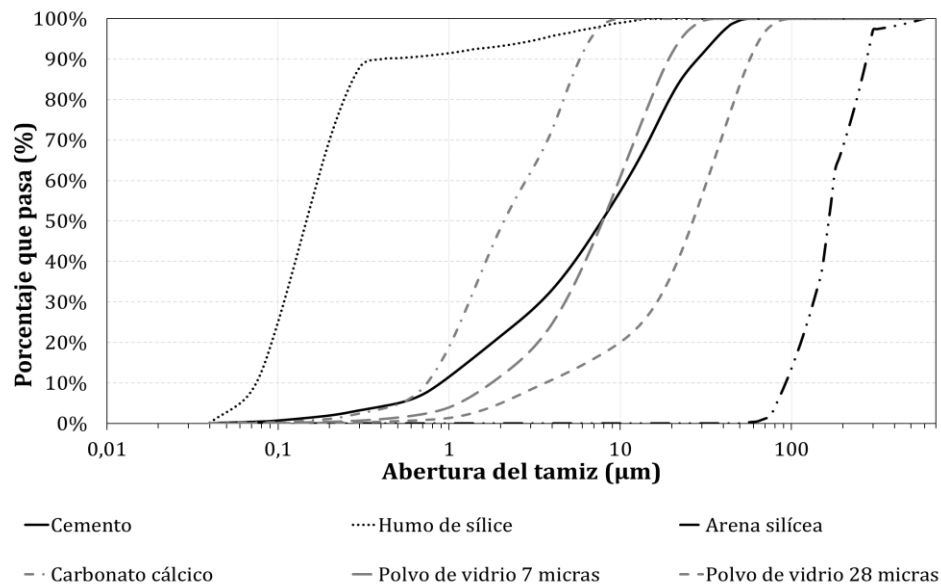
**Tabla 4-1:** Caracterización química de cemento, humo de sílice, carbonato de calcio, polvo de vidrio reciclado y arena de sílice [12].

Análisis químico %	Cemento	Humo de sílice	Carbonato	Polvo de vidrio	Arena de sílice
Densidad g/cm <sup>3</sup>	3.16	2.20	2.73	2.55	2.65
Pérdida de ignición %	2.58	0.60	42.21	1.00	0.20
SiO <sub>2</sub> , %	19.42	92.29	0.90	72.89	99.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	4.00	0.59	0.10	1.67	0.14
CaO, %	64.42	3.89	55.51	9.73	0.17
MgO, %	1.52	0.26	0.70	2.08	0.01
SO <sub>3</sub> , %	1.93	0.07	0.10	0.01	—
Na <sub>2</sub> O, %	0.19	0.31	0.03	12.54	—
K <sub>2</sub> O, %	0.39	0.54	0.00	0.76	0.05
TiO <sub>2</sub> , %	0.38	0.01	0.00	0.04	—
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , %	0.05	0.01	0.01	0.01	—
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	3.61	0.24	0.05	0.81	0.04

Los materiales fueron caracterizados en la investigación [12] en la Figura 4-1 se muestra la distribución del tamaño de partículas del cemento con diámetro medio de partícula d50 de 8 µm, humo de sílice con tamaño de partícula d50 de 0.15 µm, carbonato de calcio con tamaño d50 de 2 µm, polvo de vidrio d50 de 28 µm y 7 µm y arena silíceica con un tamaño máximo de partículas de 600 µm [12].

El polvo de vidrio se obtuvo moliendo vidrio reciclado disponible localmente con un molino de chorro a diferentes grados de finura, aplicando diferentes velocidades de molienda. [12]

**Figura 4-1:** Distribución del tamaño de partícula de los materiales usados.[12].



### 4.1.1 Cemento

El cemento utilizado en la investigación es catalogado como cemento concretero Río Claro, suministrado por Argos (CEM III HE ASTM), con una densidad de  $3.15 \text{ g/cm}^3$  y un diámetro medio de partícula ( $d_{50}$ ) de  $8 \text{ µm}$ .

**Figura 4-2:** Cemento Río Claro [12].



### 4.1.2 Humo de Sílice

Con el fin de ofrecer una mejor compacidad y obtener reacciones puzolánicas que aumentan la resistencia a compresión a largo plazo, se trabajó con humo de sílice densificado con un peso específico de  $2.20 \text{ g/cm}^3$  y  $d_{50}$  de  $0.15 \text{ }\mu\text{m}$ .

**Figura 4-3:** Humo de sílice [12].



### 4.1.3 Carbonato de calcio

Para esta investigación se utilizó carbonato de calcio tipo Betocarb con una densidad de  $2.73 \text{ g/cm}^3$  y  $d_{50}$  de  $2 \text{ }\mu\text{m}$ , que se utiliza especialmente en la fabricación de concretos y productos finales fabricados en concreto.

Este material optimiza la relación agua-cemento, es un plastificante mineral, sirve para el desarrollo de concretos fluidos y autocompactantes, mejora la estética de productos terminados y contribuye a la disminución de emisiones de  $\text{CO}_2$ .



**Figura 4-4:** Carbonato de Calcio [12].



#### 4.1.4 Polvo de vidrio

El polvo de vidrio se incluye en dos dosificaciones diferentes, una con polvo de vidrio con tamaño máximo de grano  $28\ \mu\text{m}$  y una densidad de  $2.55\ \text{g/cm}^3$  (dosificación D2) y otra con adición de polvo de vidrio de  $28\ \mu\text{m}$  y  $7\ \mu\text{m}$  y densidad de  $2.55\ \text{g/cm}^3$  (dosificación D3), respecto a una dosificación de referencia sin polvo de vidrio (dosificación D1).

**Figura 4-5:** Polvo de vidrio GP28 (izquierda) y GP7 (derecha) [12].



#### 4.1.5 Arena Silícea

Para esta investigación se trabajó con una arena silícea proveniente de la sabana de Bogotá, con tamaño máximo de grano de 600  $\mu\text{m}$  y una densidad de 2.65  $\text{g}/\text{cm}^3$  procedente de Sibaté, suministrada por Comind S.A.

**Figura 4-6:** Arena Silícea [12].



#### 4.1.6 Aditivo superplastificante de alto rango

Para obtener una buena manejabilidad de la dosificación, se trabajó con el aditivo superplastificante MasterGlenium comercializado por BASF. De acuerdo con la bibliografía revisada, el aditivo Glenium es un hiperplastificante reductor de agua de alto rango basado éteres policarboxílicos modificados, denominado HRWR (por sus siglas en inglés). Esta absorción de partículas genera una interacción electrostática temporal que hace resbalar las partículas de cemento entre sí [64].

**Figura 4-7:** Superplastificante MasterGlenium.



#### **4.1.7 Agua**

Para el diseño de dosificación se empleó agua proveniente de la red de acueducto de la ciudad de Bogotá. Se realizó el respectivo ajuste por humedad al diseño, teniendo en cuenta la absorción de los agregados.

### **4.2 Dosificaciones (D1, D2 y D3)**

Para la elaboración de las dosificaciones se definieron previamente tres dosificaciones; estas fueron:

- Dosificación D1 se ha denominado como la de control [83].
- Dosificación D2 se sustituye parcialmente el material cementicio por carbonato de calcio Betocarb ultra fino y polvo de vidrio de 28  $\mu\text{m}$  [26], [83].
- Dosificación D3 se sustituye parcialmente el material cementicio por carbonato de calcio Betocarb ultra fino, polvo de vidrio de 28  $\mu\text{m}$  y 7  $\mu\text{m}$  [12], [83].

Las dosificaciones utilizadas en esta investigación identificadas como D2 y D3 son producto de la optimización de dosificaciones de UHPC realizadas con materias primas colombianas bajo criterios esperados de flujo autocompactante y resistencia a compresión superior a 150 MPa con el menor contenido en cemento posible, y limitando el contenido de humo de sílice a 100 kg/m<sup>3</sup> [83].

Estas optimizaciones fueron realizadas por el Ing. Joaquín Abellán dentro de su investigación doctoral sobre UHPC y aplicaciones sismo resistentes empleando la teoría de empaquetamiento de Andreasen y Andersen modificada [23] y técnicas estadísticas como el diseño central compuesto [24] y la optimización multiobjetivo [25]. Para mayor información sobre los procesos de optimización de la dosificación D2 se puede consultar [26] mientras que para la dosificación D3 se pueden consultar [12], [26], [83].

La dosificación de referencia (D1) fue diseñada sin restricciones al contenido de cemento ni al humo de sílice, con la restricción de flujo estático en el rango de 240 – 260 mm. Esta dosificación se asume tiene un costo superior a las D2 y D3 por sus elevados contenidos en cemento y humo de sílice. Además, su huella de carbono es superior a las dosificaciones D2 y D3 [83].

En D2 y D3, como ya se mencionó se incluyó como material sustituto parcial del cemento, carbonato de calcio, polvo de vidrio reciclado molido a dos tamaños, con tamaños medios de partícula de 28  $\mu\text{m}$  y 7  $\mu\text{m}$  [12], [26]. Esto último cobra importancia dentro del área de desarrollo sostenible ya que se busca con este documento presentar algunas de las bondades de la reutilización de residuos industriales, lo cual tendría impacto en la disposición de residuos y en la disminución de emisiones de  $\text{CO}_2$ , debido a la utilización de menos cemento; siendo una alternativa que brinda mejoras en el desempeño de las dosificaciones de concreto utilizando materiales locales que constituiría una alternativa de bajo costo frente al uso de adiciones comerciales como el humo de sílice, polvo de cuarzo o metacaolín [83].

La relación agua/binder se mantuvo constante para las dosificaciones D2 y D3 con el fin de no incluir más variables en la investigación, sin embargo, para la dosificación D1 la relación agua/binder fue ligeramente mayor debido a que la cantidad de humo de sílice aumenta y la dosificación se debe hidratar para lograr que fluya. Por otro lado, la cantidad de superplastificante es limitada porque si se produce una dosificación muy viscosa no

puede salir el aire y se crea una estructura muy porosa y de baja resistencia a la compresión [78].

En la Tabla 4-2 se muestran los volúmenes de cada material dentro de las dosificaciones y la relación agua/binder para las tres dosificaciones.

**Tabla 4-2:** Proporción de materiales usados en dosificaciones [83].

Material	Dosificación D1 Peso kg/m <sup>3</sup>	Dosificación D2 Peso kg/m <sup>3</sup>	Dosificación D3 Peso kg/m <sup>3</sup>
Cemento Concretero	852.26	620	620
Humo de Sílice Toxement	271,7	100	100
Superplastificante MasterGlenium	26.46	21.48	21
Agua	245	210.2	200
Arena Sílicea 600µm	834.27	778.16	888.83
Polvo de vidrio 28µm	-	309.98	168.6
Polvo de vidrio 7µm	-	-	187.55
Carbonato de Calcio Betocarb Ultra Fino	-	257.09	118.43
Agua/binder	0.218	0.163	0.167

### 4.3 Densidad de empaquetamiento virtual

Debido a la importancia de lograr una matriz densa, una porosidad reducida y una microestructura interna mejorada, para obtener propiedades mecánicas y de durabilidad superiores, se calcula la densidad de empaquetamiento virtual VPD (por sus siglas en inglés) de las dosificaciones. Lo anterior de acuerdo con la teoría del modelo de empaquetamiento compresivo [79], [80].

La ecuación general, que representa la densidad de empaquetamiento virtual (VPD) de una dosificación granular que contiene n clases de materiales, cuando la clase i es dominante, viene dada por la siguiente ecuación:

$$VPD = \text{Min} \left\{ \left\{ \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} [1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i(1 - \frac{1}{\beta_j})] y_f - \sum_{j=i+1}^n [1 - \frac{a_{ij}\beta_i}{\beta_j}] y_f} \right\} \middle| i = 1, \dots, n \right\} \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

VPD: Densidad de empaquetamiento virtual de una dosificación polidispersa de n componentes según la teoría del modelo de empaquetamiento compresivo de [79], [80].

$\beta_i$ : Densidad de empaquetamiento residual de una fracción monodispersa que tiene un diámetro igual a  $d_i$ .

$d_i$ : Diámetro de la i-ésima clase de partículas. Cuando  $i > j$ ,  $d_i < d_j$

$b_{ij}$ : Parámetro que describe el efecto de muro ejercido por la clase j sobre la clase dominante i.

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1.50} \quad \text{Ec.2}$$

$a_{ij}$ : Parámetro que describe el efecto de aflojamiento ejercido por la clase j sobre la clase dominante i.

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1.02}} \quad \text{Ec. 3}$$

$y_i$ : Fracción de volumen de la clase i, relacionada con el volumen sólido total.

La densidad de empaquetamiento virtual para los diferentes materiales usados en la elaboración de las dosificaciones, se muestra en la Tabla 4-3 [79]. De estas dependerá en su mayoría el comportamiento de durabilidad y resistencia de los especímenes elaborados.

Como se puede observar el humo de sílice dada su alta finura es el que presenta mayor grado de empaquetamiento, en comparación con los otros materiales, que son prácticamente iguales.

**Tabla 4-3:** Densidad de empaquetamiento virtual para cada material [79].

Densidad de empaquetamiento virtual ( $\beta$ )				
cemento	Humo de sílice	Carbonato de calcio	Polvo de vidrio	Arena Silícea
0.553	0.720	0.553	0.554	0.550

## 4.4 Modelo Anova a dos vías

Para analizar estadísticamente los diferentes resultados de los ensayos de propiedades mecánicas y de durabilidad de las dosificaciones, se aplicó el análisis de varianza Anova a dos vías, que permite estudiar simultáneamente los efectos de dos fuentes de variación. En este caso las fuentes son la edad y el material, teniendo en cuenta que el factor tiempo y material tienen tres niveles para todos los ensayos estudiados. Es decir son tres dosificaciones a tres edades diferentes [12].

Mediante este análisis se pudo estudiar si existían diferencias significativas entre las propiedades medias, en función de las combinaciones edad-material en los resultados de los diferentes ensayos de las dosificaciones [12]. Para el análisis de varianza (Anova) se utilizó el entorno de programación R con enfoque al análisis estadístico.

## 4.5 Metodología

### 4.5.1 Preparación y vaciado de las muestras.

Definidas las proporciones de los componentes de cada una de las dosificaciones descritas anteriormente, se realizó la preparación de la dosificación teniendo en cuenta el número de probetas a ensayar de acuerdo al tipo de moldes, modo de fabricación y al curado. Seguido a esto se realizaron los ensayos en estado fresco, y se procedió a vaciar las muestras en los moldes, luego de 24 horas se desmoldó e inmediatamente inició el curado en agua. Finalmente, se realizaron los ensayos en estado endurecido a edades de 7, 28 y 90 días. El detalle del procedimiento se muestra a continuación:

El procedimiento de dosificación se desarrolla de acuerdo con las investigaciones [12], [83]. Primero se pesaron en la balanza las cantidades necesarias de cada material y se

mezclaron primero los materiales cementantes secos (cemento, humo de sílice, carbonato de calcio y polvo de vidrio). Luego haciendo uso de una mezcladora mecánica de 8 litros y tres velocidades previamente humedecida, ver Figura 4-8, se incorporó el agua y el superplastificante, se mezcló durante un minuto y medio a velocidad uno (107 RPM), como se ve en la Figura 4-8. A continuación, se incorporaron los materiales cementicios, que fueron previamente mezclados. Esta dosificación se realizó a velocidad uno hasta observar un primer punto de reacción, aproximadamente a los tres minutos, donde se forman unas pequeñas esferas brillantes, tal como se observa en la Figura 4-9; luego se sube a velocidad dos (198 RPM) durante un minuto.

Pasado este tiempo, se mueve el material de los lados del recipiente y se continúa mezclando durante tres minutos a velocidad tres (365 RPM). En este momento la dosificación empezó a presentar un punto de fluidez que se puede observar en la Figura 4-9, que se caracteriza porque la muestra se ve completamente homogénea y húmeda; luego se baja a velocidad uno y se incorpora la arena silícea y se mezcla durante un minuto. Después se mezcla a velocidad dos durante tres minutos y finalmente se mezcla a velocidad tres durante tres minutos. En este momento la dosificación presentó suficiente fluidez, manejabilidad y es capaz de autollenar el recipiente en cada pasada de las aspas de la mezcladora. En la Figura 4-10 se puede observar la consistencia final de la dosificación.



**Figura 4-8:** Mezcladora (izquierda). Mezcla de agua y superplastificante (derecha)



**Figura 4-9:** Punto de reacción (izquierda). Punto de fluidez (derecha)



**Figura 4-10:** Consistencia del material al final de la dosificación.



La elaboración de probetas se realizó usando tres tipos de moldes bajo condiciones de temperatura 23°C y humedad relativa entre 50-70% en laboratorio:

- Cilindros: Diámetro 7.5 cm y altura 15 cm, usados para ensayos de ISAT y velocidad de pulso y módulo de elasticidad a 7, 28 y 90 días.
- Cilindros: Diámetro 10 cm y altura 20 cm, usados para ensayos de Permeabilidad a los cloruros y masa unitaria a 7, 28 y 90 días.
- Cubos: 5 cm x 5 cm x 5 cm, para ensayos de resistencia a compresión a 28 y 90 días.

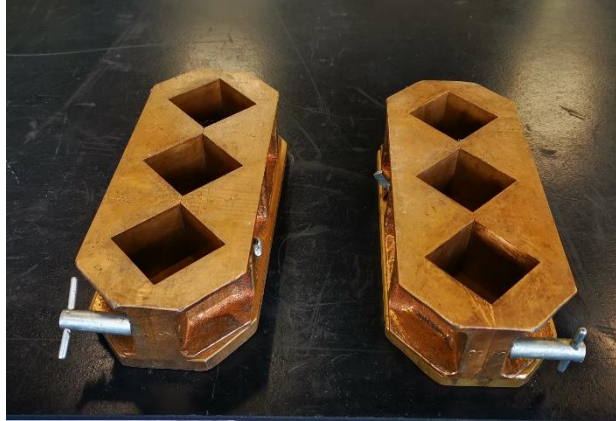
**Figura 4-11:** Moldes para cilindros de 7.5 cmx15 cm y 10 cmx20 cm.



**Figura 4-12:** Disposición de cilindros de 7.5 cmx15 cm y 10 cmx20 cm.



**Figura 4-13:** Moldes de cubos de 5cmx5cmx5cm.



Luego de 24 horas se procedió a desmoldar y se sumergieron las muestras de los cilindros en agua para permitir un curado bajo condiciones húmedas, hasta la edad de los ensayos.

**Figura 4-14:** Cilindros en curado.



El curado para los cubos se realizó a una temperatura de 23°C y una humedad cercana al 95%±5%, garantizado por la cámara de curado del laboratorio de estructuras. En la Figura 4-15 se observan los cubos desmoldados.

**Figura 4-15:** Cubos desmoldados.



A continuación, se presenta la Tabla 4-4 con el resumen de los ensayos del programa experimental.

**Tabla 4-4:** Ensayos del programa experimental.

	Edad (Días)	Cantidad	ISAT	UPV	Compresión (f'c)	Módulo de elasticidad (Ec)	Cloruros	Porosidad, masa unitaria y absorción
Cilindro 10X20	7	6					X	X
Cilindro 7.5X15	7	6	X	X		X		
Cilindro 10X20	28	9					X	X
Cilindro 7.5X15	28	9	X	X	X	X		
Cilindro 10X20	90	7					X	X
Cilindro 7.5X15	90	10	X	X	X	X		
Cubos 5.0x5.0x5.0	7	6			X			
Cubos 5.0x5.0x5.0	28	9			X			
Cubos 5.0x5.0x5.0	90	10			X			



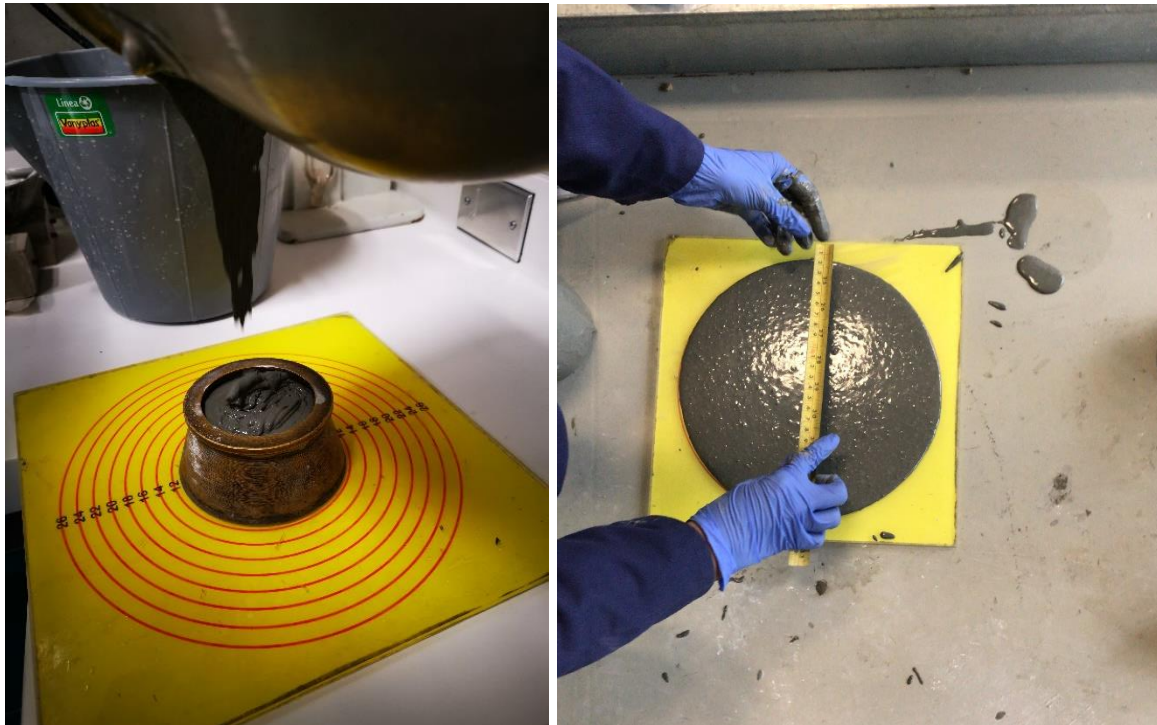
## 4.6 Ensayos

### 4.6.1 Método de prueba estándar para el flujo de mortero de cemento hidráulico.

La fluidez de la dosificación fresca se midió inmediatamente después de finalizar el proceso de mezcla, mediante determinación del flujo medio de cuatro diámetros, de acuerdo con el método estándar ASTM C1437 sin golpes.

Para medir el flujo, Figura 4-16, se llenó el cono de asentamiento con la dosificación y luego se retiró lentamente para permitir que el mortero fluyera uniformemente sobre la tabla de flujo y se tomaron cuatro diámetros para tener el promedio. La prueba se completó y la dosificación se vertió dentro de los primeros 20 minutos en los moldes cilíndricos para los posteriores ensayos de propiedades mecánicas y de durabilidad en concreto endurecido.

**Figura 4-16:** Ensayo de flujo a dosificaciones de mortero.



## 4.6.2 Resistencia a la Compresión

La resistencia a compresión se midió sobre cubos de 50x50x50 mm siguiendo los parámetros indicados en la ASTM C109 – “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars”.

Esta propiedad se evaluó sobre probetas cúbicas se elaboraron nueve muestras para la dosificación D1 y ocho muestras para cada una de las dosificaciones D2 y D3 para ensayarse a 7, 28 y 90 días, esto se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C109/C109M “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”.

Las dimensiones en todos sus lados fueron de 5 cm en promedio. Se dispusieron los cubos de manera que las caras más regulares quedaran en contacto con la mesa y el cabezal. Cada una de sus caras fue medida 3 veces y el promedio fue el usado para determinar su resistencia a compresión. La configuración de carga y configuración básica de prueba, se mantuvieron constantes.

**Figura 4-17:** Montaje ensayo de compresión en cubos de concreto.



### 4.6.3 Módulo de Elasticidad

Módulo de elasticidad medido sobre cilindros de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C469/C469M - "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression".

Uno de los valores más importantes para el comportamiento estructural es el módulo de elasticidad, puesto que este influye en las deflexiones, derivas y rigidez de una estructura. El módulo de elasticidad establece una relación constante entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones unitarias antes de llegar al límite de proporcionalidad del material.

El módulo elástico en compresión se evaluó sobre especímenes cilíndricos de diámetro 75 mm x 150 mm de altura en un total de nueve cilindros para la dosificación D1 y ocho muestras para cada una de las dosificaciones D2 y D3 a 7, 28 y 90 días para un total 25 muestras. El procedimiento se realizó acorde con la norma ASTM C469 / C469M - "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression".

**Figura 4-18:** Montaje para ensayo de módulo elástico del concreto.





#### 4.6.4 Velocidad de pulso ultrasónico

La velocidad de pulso ultrasónico se evaluó sobre los mismos especímenes cilíndricos de diámetro 75 mm x 150 mm de altura y está basado en la norma ASTM C597 - "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete".

La velocidad de pulso ultrasónico, es un método de ensayo para obtener propiedades del concreto, entre ellas uniformidad, defectos tales como vacíos y cavidades, estimar profundidades de grietas superficiales, estimar el espesor de una capa de menor calidad en el concreto e identificar cambios en las propiedades del concreto.

Se ha encontrado que la velocidad de pulso ultrasónico depende principalmente del tipo de agregado, tamaño de agregado y su porcentaje total dentro de la dosificación de concreto y en menor escala de las condiciones de curado, porcentaje de cemento, tipo de cemento y uso de adiciones entre otros [27].

La velocidad de pulso ultrasónico se evaluó sobre especímenes cilíndricos de diámetro 75 mm x 150 mm de altura, los ensayos se hicieron para las tres dosificaciones de concreto a 7, 28 y 90 días para un total de 25 muestras. El ensayo está basado en la norma ASTM C597 - "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete".

En la Figura 4-19, se observa la disposición de la muestra y el equipo utilizado para la realización de este ensayo. El ensayo consiste en producir pulsos de vibraciones longitudinales generados por un transductor electroacústico que se mantiene en contacto con una de las superficies bajo prueba. Después de atravesar el concreto, los pulsos son recibidos y convertidos en energía eléctrica por un segundo transductor ubicado a una distancia  $L$  del transductor transmisor. El tiempo de tránsito  $T$  se mide electrónicamente. La velocidad del pulso  $V$  se calcula dividiendo  $L$  por  $T$ .

De acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V=L/T \quad \text{Ec.4}$$

donde:

V = Velocidad de pulso (m/s o pies/s)

L = Distancia entre transductores (m o pies)

T = Tiempo de tránsito efectivo

**Figura 4-19:** Ensayo de medición de velocidad de pulso ultrasónico.



#### 4.6.5 Porcentaje de vacíos en concreto endurecido

El porcentaje de vacíos en el concreto endurecido, se realizó siguiendo los parámetros indicados en la ASTM C642 – “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”, sobre probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura en promedio.

El porcentaje de vacíos del concreto está relacionada con su durabilidad y calidad, ya que, a mayor porosidad mayor exposición ambiental del material que permite el paso de agua pura o que lleva iones agresivos, dióxido de carbono y oxígeno. Por otro lado, esta influye

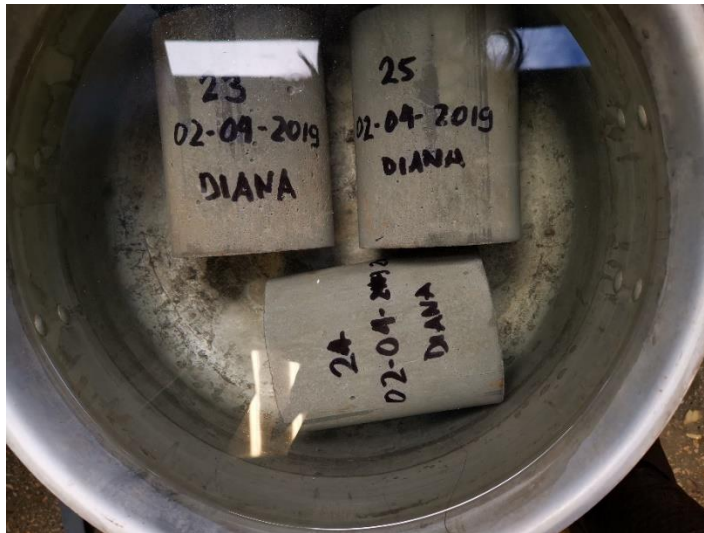
en varias propiedades del concreto, tales como: resistencia a la abrasión, estabilidad química, gravedad específica y adherencia de la pasta con los agregados entre otros.

Este ensayo se realizó siguiendo los parámetros indicados en la ASTM C642 – “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”, sobre probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura en promedio, y consistió en que una vez las muestras cumplieron su edad de ensayo, se secaron en horno a una temperatura de 100 a 110 °C durante no menos de 24 h, de acuerdo con la Figura 4-20. Luego se pesaron para obtener el peso A, después se sumergieron en agua por no menos de 48 h y se obtuvo su peso B, de acuerdo con la Figura 4-21. Luego se sumergieron en agua hirviendo por un periodo de 5 h después de la ebullición, se retiraron del agua y se deja enfriar durante 14 horas, resultando así el peso C. Por último, se tomó el peso suspendiendo la muestra en agua. Este se llama peso D. Lo anterior se muestra en la Figura 4-22.

**Figura 4-20:** Muestras en horno a 110 °C para obtener peso A.



**Figura 4-21:** Muestras en agua durante 48 h para obtener masa B y hervidas por 5 h para peso C.



**Figura 4-22:** Peso de la muestra sumergida en agua para obtener peso D.



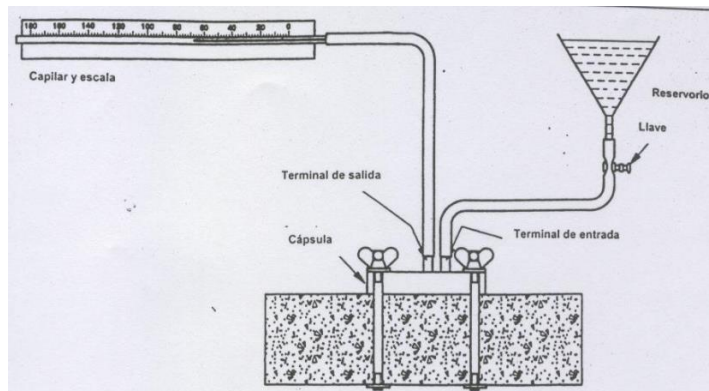
#### **4.6.6 Absorción superficial inicial (ISAT)**

La absorción inicial del concreto se determinó mediante ensayo de Absorción inicial superficial del concreto ( ISAT por sus siglas en inglés) acorde a la norma BS 1881-208 “Testing concrete Recommendations for the determination of the initial surface absorption of concrete”, sobre probetas cilíndricas de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura en promedio.

Para este ensayo se siguió la especificación de la norma BS 1881-208 “Testing concrete Recommendations for the determination of the initial surface absorption of concrete”. Este ensayo permite evaluar la calidad del acabado y la durabilidad de la superficie bajo condiciones de intemperismo, midiendo la cantidad de agua que ingresa al concreto por unidad de tiempo y superficie para determinar la velocidad de absorción.

El método consiste en determinar en una escala determinada, relacionada con el tamaño de la cápsula, la distancia que se desplaza la lámina de agua dentro de un capilar durante rangos de tiempo de 10, 20 y 30 minutos, el capilar se encuentra conectado en un extremo a una manguera y esta a su vez a una cápsula hermética sellada a la superficie del concreto y conectada por medio de tubos flexibles a un reservorio, como se observa en la Figura 4-23. La medición de esta propiedad se llevó a cabo sobre cilindros de 75 mm de diámetro por 150 mm de altura, para las tres dosificaciones en estudio a 7, 28 y 90 días para un total 23 muestras.

**Figura 4-23:** Ensayo de absorción superficial inicial (Initial Surface Absorption Test) BS 1881.



En la Figura 4-24 se presenta el montaje utilizado para la realización de este ensayo.

**Figura 4-24:** Montaje ensayo de absorción superficial inicial.



#### 4.6.7 Permeabilidad a los cloruros

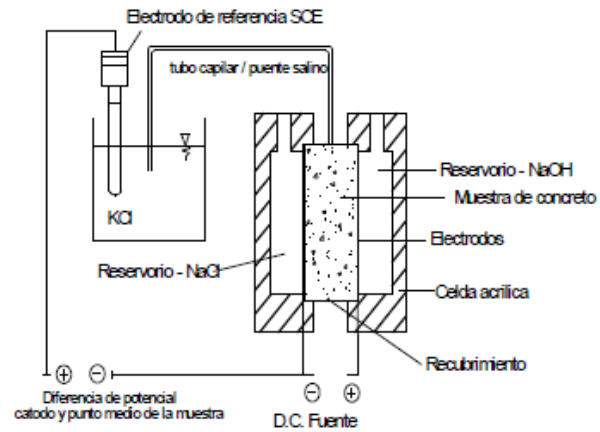
La Permeabilidad al ión cloruro, se evaluó según lo estipulado en la norma ASTM C1202 – “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration”.

El método de ensayo se basa en la determinación en laboratorio de la conductancia eléctrica de muestras de concreto, obteniéndose una indicación rápida de la resistencia de la muestra a la penetración de iones cloruro. Este método de prueba es adecuado para la evaluación de materiales y proporciones para propósitos de diseño, investigación y desarrollo.

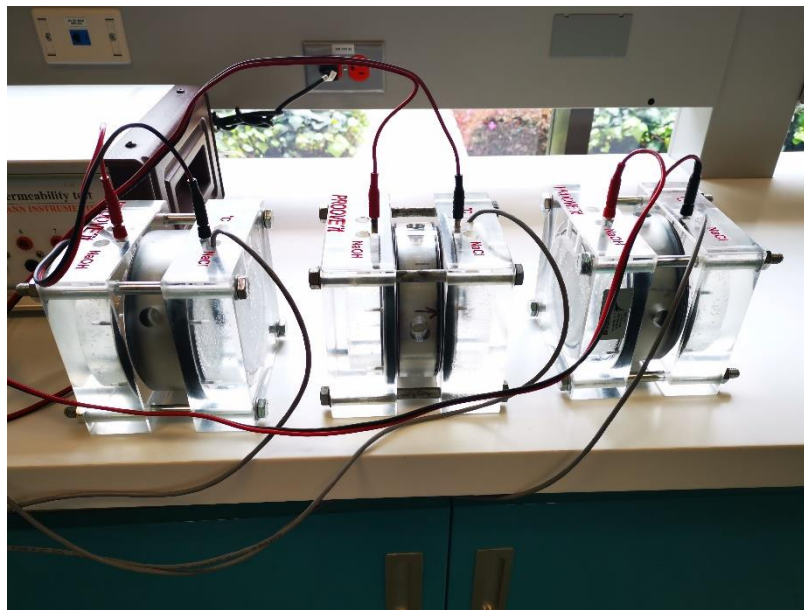
El ensayo se basa en la norma ASTM C1202 – “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration”. Mediante la determinación de la cantidad de corriente eléctrica, medida en Coulombs, que pasa a través de una muestra de 100 mm de diámetro y  $50\pm 3$  mm de espesor, durante un periodo de 6 horas, en donde una diferencia de potencial DC de 60 V se mantiene constante a través de las caras de la muestra por medio de una cápsula que permite que una cara se ponga en contacto con una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3 % y la otra en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 0.3M. Se ha encontrado que la carga total pasada, en coulombs, está relacionada con la resistencia de la muestra a la penetración de iones de cloruro. La preparación de la muestra se realiza saturándola con agua a la cual se le eliminó el aire con el uso de la bomba de vacío; la cara externa (perímetro) de la muestra es sellada mediante el uso de sikadur 32 obligando a pasar los iones solo a través de la cara durante el ensayo ver Figura 4-25. Las tres dosificaciones fueron ensayadas a 7, 28 y 90 días para un total 23 muestras, de acuerdo con el montaje que se muestra en la Figura 4-26.



**Figura 4-25:** Esquema del ensayo para evaluar la permeabilidad al ión cloruro.



**Figura 4-26:** Montaje del ensayo para evaluar la permeabilidad al ión cloruro.





## 5. Resultados y Discusión

### 5.1 Propiedades de las dosificaciones en estado fresco

Los resultados del concreto endurecido están relacionadas con las propiedades de las dosificaciones en estado fresco, por lo tanto, se evaluó el flujo de las dosificaciones de acuerdo con el procedimiento descrito en el numeral 4.5.1.

#### 5.1.1 Método de prueba estándar para el flujo de mortero de cemento hidráulico

##### 5.1.1.1 Dosificaciones

A continuación se presenta la Tabla 5-1 con información del flujo obtenido de las dosificaciones en estudio.

**Tabla 5-1:** Flujo de mortero de cemento hidráulico-Dosificaciones.

DOSIFICACIÓN	PROMEDIO (mm)
D1	264
D2	261
D3	255

De acuerdo con [83] el flujo adecuado para una dosificación de concreto autocompactante debe estar entre 240 a 260 mm.

En relación a los resultados del flujo estático es importante destacar lo siguiente:

- 1) Para alcanzar un flujo cercano a los 260 mm fue necesaria para la dosificación D1 una cantidad de agua ligeramente superior a la usada en las otras dosificaciones, debido a la presencia de mayor cantidad de humo de sílice con una gran superficie específica; por lo que, para evitar una dosificación demasiado pegajosa y viscosa, que no permitiese la salida de las burbujas de aire, el contenido de superplastificante debió limitarse.

2) El polvo de vidrio tiene un elevado contenido en  $\text{Na}_2\text{O}$ , por lo que la alcalinidad se incrementa en las dosificaciones en las que se reemplaza parcialmente contenido de cemento por polvo de vidrio (consulte con tabla 4-1). Por lo tanto, el bajo contenido de cemento incrementa el flujo debido a la mayor alcalinidad de la fase líquida [12]. Por otro lado, estudios han demostrado que los medios alcalinos favorecen el funcionamiento de los superplastificantes a base de policarboxilato [12], [66]; esto permite que las dosificaciones D2 y D3 precisen una menor cantidad de agua y de policarboxilato para alcanzar un flujo cercano a los 260 mm.

3) El carbonato de calcio es un fluidificante natural, por lo tanto ayuda en la trabajabilidad de la dosificación y permite reducir la cantidad de agua en las dosificaciones D2 y D3.

## 5.2 Densidad de empaquetamiento virtual

Para medir la densificación y la homogeneidad de la microestructura esperada de los especímenes elaborados con los materiales seleccionados, se empleó la ecuación del modelo de empaquetamiento compresivo. A continuación, en la Tabla 5-2, se muestran los resultados para las dosificaciones de acuerdo a la densidad de empaquetamiento virtual de cada material [79]:

**Tabla 5-2:** Densidad de empaquetamiento virtual, VPD [79].

	D1	D2	D3
VPD	0.821	0.802	0.773

De acuerdo con la Tabla 5-2 se tiene que la dosificación D1 presenta un mejor empaquetamiento, seguida por la D2. Esto debido a la gran cantidad de humo de sílice y cemento presente en la dosificación D1 que permite una distribución óptima del tamaño de partículas. Por otro lado, al reemplazar parcialmente cemento y humo de sílice por polvo de vidrio cuyo de tamaño de partículas es mayor, disminuye la VPD, sin embargo el valor

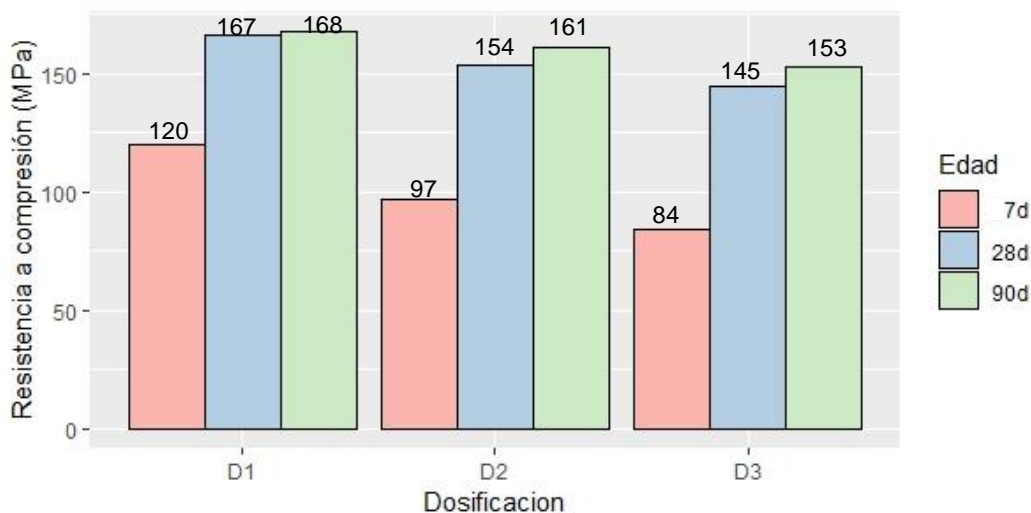
no se aleja de la dosificación D1 debido a la incorporación de carbonato de calcio, cuyo tamaño de partícula es menor que las de cemento y humo de sílice.

## 5.3 Propiedades Mecánicas de las dosificaciones

### 5.3.1 Resistencia a la Compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión realizados a los cubos se muestran en la Figura 5-1, se determinan los promedios de nueve muestras para la dosificación D1 y ocho muestras para las dosificaciones D2 y D3 para 7, 28 y 90 días. El curado se realizó en cámara húmeda al  $95\% \pm 5\%$ , y se mantuvo constante para todas las muestras.

**Figura 5-1:** Resistencia a la compresión promedio de las dosificaciones de concreto (cubos).



Mediante los valores presentados en la Figura 5-1, se puede apreciar la variación de las resistencias a la compresión de las muestras de concreto en función del tiempo. También es posible evaluar si existen diferencias significativas entre las resistencias medias de las distintas dosificaciones, encontrándose que la dosificación control presenta la resistencia mayor a los 7 días de ensayo, lo cual se justifica teniendo en cuenta que es la que tiene

mayor contenido de cemento, y humo de sílice, seguida de la dosificación D2. Sin embargo, a edades superiores las resistencias se muestran muy similares. La resistencia alcanzada en los cubos a los 90 días, muestra que el concreto se puede clasificar como UHPC ya que este supera los 150 MPa.

Se realizó un análisis de los valores obtenidos de la resistencia a compresión, y se encontraron unos indicadores con respecto a la dosificación de control, a edades de 7, 28 y 90 días. En La Tabla 5-3 se muestran valores comparativos.

**Tabla 5-3** Relación entre los valores de las diferentes propiedades para cada dosificación con respecto a la muestra control – Propiedades mecánicas.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		
	D2/control	D3/control
<b>7 d</b>	0.81	0.70
<b>28 d</b>	0.92	0.87
<b>90 d</b>	0.96	0.91

De acuerdo con los valores presentados en la Tabla 5-3, con respecto a la resistencia a la compresión, se evidencia el aumento de esta relación a las diferentes edades de curado para todas las tres dosificaciones. El mejor comportamiento lo presenta la dosificación D2, donde para la edad de 90 días alcanza un 96% de la resistencia con relación a la muestra control.

Los resultados se analizan estadísticamente empleando un modelo Anova a dos vías, que permite analizar en conjunto los efectos de dos variables. Para explicar la resistencia se usa la variable tiempo y dosificaciones, por lo tanto, el impacto de un factor depende del nivel del otro.

A continuación, se presenta la Tabla 5-4, con el análisis Anova, correspondiente al modelo estadístico antes planteado, en el cual se estudian simultáneamente los efectos de la edad y las dosificaciones.

**Tabla 5-4** Análisis de varianza de la resistencia la compresión.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosificación	2	2259	1130	19.27	5.49e-05 ***
Edad	2	16164	8082	137.85	8.19e-11 ***
Dosificación: Edad	4	169	42	0.72	0.591
Residuals	16	938	59		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Los valores presentados en la Tabla 5-4 indican que no hay una variación en las resistencias a la compresión de las muestras de concreto en función de las combinaciones edad-dosificación. También es posible evaluar que existen diferencias significativas entre las resistencias medias con los distintos tipos de dosificación y edad.

Como los valores-P de la interacción entre dosificación-edad son mayores a 0.05, se acepta la hipótesis de que la interacción de estas dos variables no tiene un efecto estadísticamente relevante sobre la resistencia a la compresión con un 95% de nivel de confianza. De esta manera se puede concluir que los factores edad y dosificación son significativos; esto indica que las diferencias en las resistencias de las muestras de concreto, se deben a la influencia de la cantidad del material cementante y a la edad de ensayo, de acuerdo con lo esperado, se presenta aumento de la resistencia del concreto en el tiempo; siendo la dosificación D1, que corresponde a la de control la que mayor resistencia a la compresión presenta, seguida de la dosificación D2 con inclusión de polvo de vidrio de 28  $\mu\text{m}$ , pero sin que se presente una diferencia muy grande con la D3, por lo tanto, se resalta así la conveniencia de la utilización de materiales cementantes suplementarios para sustitución parcial de cemento, lo cual se puede comparar con las

investigaciones realizadas en [5], [73] y [75] donde reemplazando el humo de sílice, se consiguen resistencias superiores a 150 MPa e incluso hasta 160 MPa.

Por otro lado, se muestra una comparación en la Tabla 5-5 entre las resistencias obtenidas en el ensayo a compresión de las muestras cilíndricas y los cubos en las diferentes edades.

**Tabla 5-5** Comparación de la resistencia a compresión entre cilindros y cubos.

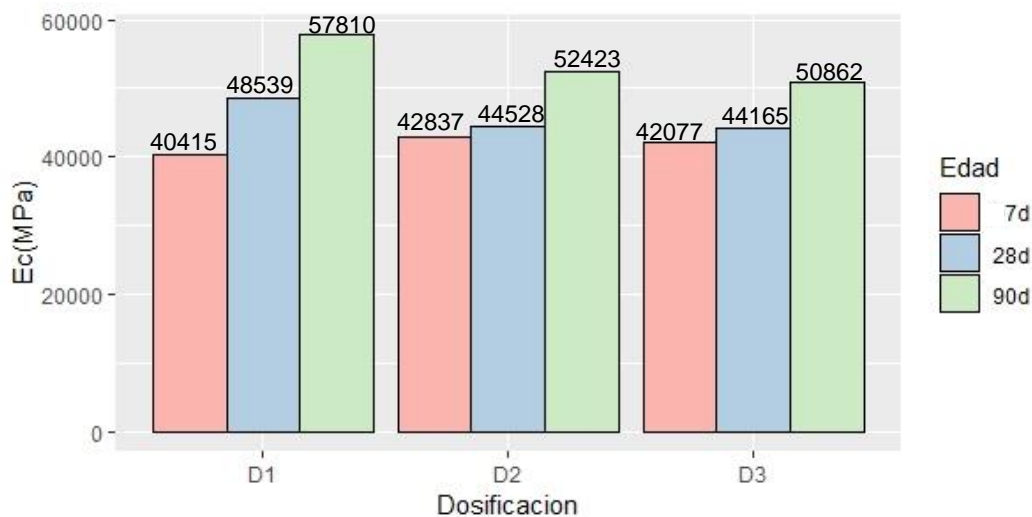
Dosificación	Edad (días)	Resistencia f'c		Diferencia
		Cubos (Mpa)	Cilindros (Mpa)	
D1	7	120	113	6%
D1	28	167	155	7%
D1	90	168	159	5%
D2	7	97	91	6%
D2	28	154	148	4%
D2	90	161	149	8%
D3	7	84	79	6%
D3	28	145	138	4%
D3	90	153	141	8%

De acuerdo con la Tabla 5-5 se tiene que la resistencia a compresión de los cubos está en promedio por encima del 6%, este resultado es cercano a lo encontrado en [11] donde el tamaño de las muestras influye en las propiedades mecánicas debido a la posibilidad de encontrar defectos en muestras de mayor tamaño.

### 5.3.1 Módulo de Elasticidad

En la Figura 5-2, se presentan los resultados obtenidos en las tres edades de ensayo para cada una de las dosificaciones bajo estudio. Con los resultados se observa que el módulo elástico aumenta con la edad de curado. Se encontró que las dosificaciones D2 y D3 presentan valores mayores que la muestra control para los primeros 7 días, sin embargo, a los 28 y 90 días la dosificación de control supera las otras dos.

**Figura 5-2:** Resultados del módulo elástico en compresión.



De acuerdo con lo reportado en [81] el aumento del módulo de elasticidad con la edad de curado, varía dependiendo de la puzolana que se adicione, indicando que, para materiales muy activos como el humo de sílice, a edades tempranas el incremento de  $E_c$ , es más rápido comparado con la muestra control, esto se explica a través del proceso de hidratación de dicho material. Por otro lado, de acuerdo con lo reportado en [12], la incorporación de carbonato de calcio en UHPC mejora el proceso de hidratación de las dosificaciones a una edad temprana, lo que lleva a un relleno de partículas más denso y a mejorar las propiedades mecánicas. Asimismo en [12] se encontró que el polvo de vidrio aumenta la velocidad de disolución del cemento Portland, por lo que el proceso de hidratación se acelera.

Se realizó un análisis de los valores obtenidos del módulo de elasticidad, se encontraron unos indicadores con respecto a la dosificación de control, a edades de 7, 28 y 90 días. En La Tabla 5-6 se muestran los valores comparativos.

**Tabla 5-6** Relación entre los valores de las diferentes propiedades para cada dosificación con respecto a la muestra control – Propiedades mecánicas.

<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD</b>		
	D2/control	D3/control
<b>7 d</b>	1.06	1.04
<b>28 d</b>	0.92	0.91
<b>90 d</b>	0.91	0.88

De la Tabla 5-6 se observa a edades tempranas un aumento del módulo de elasticidad de los cilindros, por encima de la dosificación de control, sin embargo, a mayor edad el módulo de elasticidad de la dosificación de control tiene un mejor comportamiento con respecto a las dosificaciones D2 y D3; los cuales presentan un comportamiento similar. Es importante resaltar que el comportamiento del módulo de elasticidad no es proporcional a la resistencia a compresión, donde se obtuvo mejor comportamiento para la dosificación de control. Lo anterior debido a que estos se realizaron sobre cubos, los cuales como se indicó en la Tabla 5-5 tuvieron un aumento en la resistencia entre el 4 y 8% con respecto a los cilindros.

Analizando los resultados estadísticamente mediante un modelo Anova a dos vías se tiene a continuación la Tabla 5-7, con el análisis Anova, correspondiente al modelo estadístico antes planteado, en el cual se estudian simultáneamente los efectos de la edad y las dosificaciones.



**Tabla 5-7** Análisis de varianza del módulo de elasticidad.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosificación	2	107073959	53536980	1.427	0.26895
Edad	2	620285462	310142731	8.268	0.00342 **
Dosificación: Edad	4	60071436	15017859	0.400	0.80555
Residuals	16	600210882	37513180		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

De la Tabla 5-7 de Análisis de Varianza se concluye que:

Se rechaza que el factor dosificación sea significativo respecto al módulo de elasticidad al presentar un P-value superior a 0.05 concluyendo que los diferentes tipos de material usados, implican tasas promedio similares del módulo elástico en comprensión.

Se aprecia la significancia del factor edad al presentar un P-value inferior a 0.05. Asimismo, se aprecia que la interacción de los factores dosificación-edad, no es significativa al presentarse un valor del P-value superior al 0.05.

Por los resultados expuestos en la anterior Tabla 5-7, se concluye que la adición de otros materiales cementantes suplementarios de menor costo igualan los valores de la dosificación control donde se utilizó humo de sílice para los primeros 7 días.

Por otro lado, se tiene que de acuerdo con ACI 239 Tabla 4.2, el módulo de elasticidad ( $E_c$ ) de un concreto UHPC está entre los 40000 MPa y 50000 MPa. De acuerdo a lo anterior, los valores encontrados en esta investigación del módulo de elasticidad para las diferentes dosificaciones, se encuentra que todas están por encima de los 40000 MPa a los 7 días, y alcanzan valores por encima de los 50000 MPa a los 28 días. También es importante mencionar que para la dosificación D1 donde el contenido de cemento es más elevado, el módulo de elasticidad está cercano a los 60000 MPa. Estos módulos elásticos altos en el área de ingeniería estructural son favorables dado que se aumenta la rigidez de los elementos y por consiguiente, se tendrán menos deformaciones; a su vez, este

comportamiento permite que dichos elementos tengan menores dimensiones lo que se ve reflejado en una reducción en el peso de la estructura.

Así mismo, el Reglamento de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-10, indica una correlación entre el módulo de elasticidad,  $E_c$ , y la resistencia a la compresión para cualquier tipo de agregado, cuyo valor se expresa con la siguiente ecuación:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad \text{Ec. 5}$$

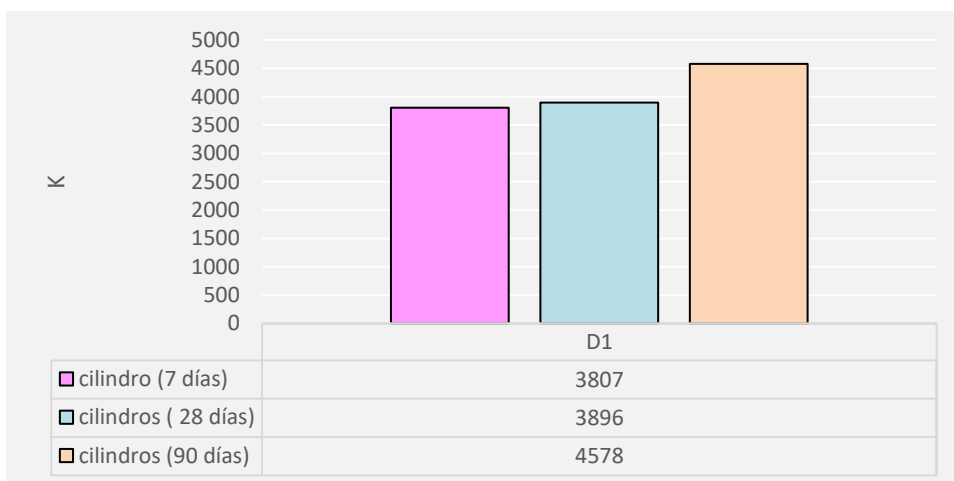
Donde:

$E_c$ =módulo de elasticidad del concreto (MPa)

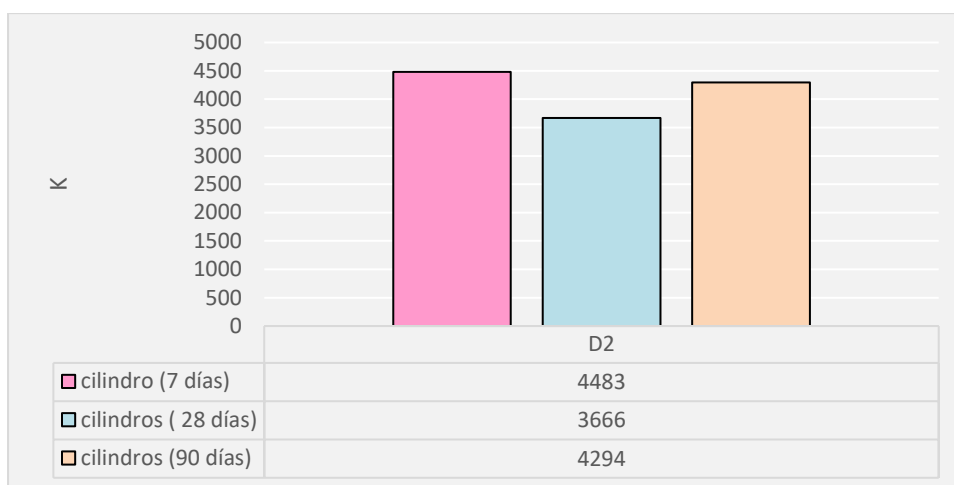
$f'_c$ = resistencia a la compresión del concreto (MPa)

De acuerdo con la ecuación Ec. 5, 4700 es una correlación entre la raíz cuadrada de  $f'_c$  y  $E_c$ . Esta correlación se denominará con la letra K. En las Figuras 5-3, 5-4 y 5-5 se muestra un comparativo del valor K de acuerdo a estas resistencias obtenidas.

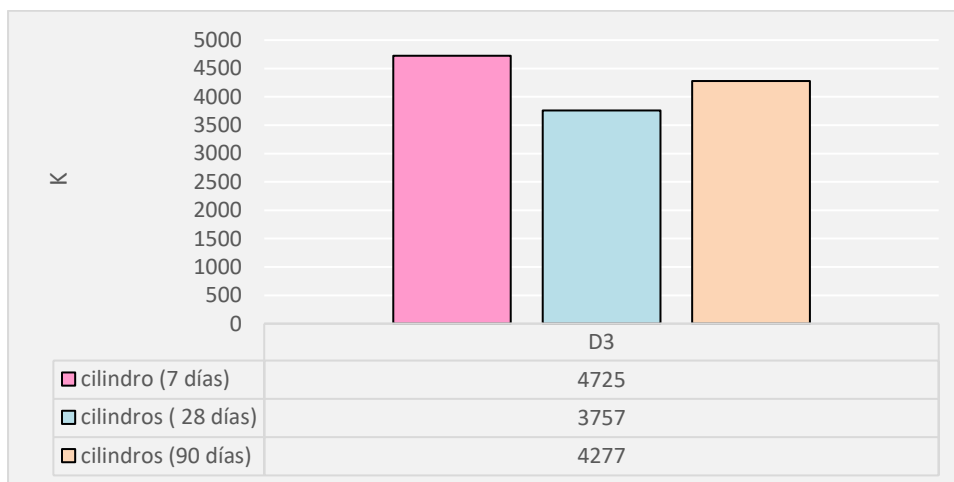
**Figura 5-3:** Relación entre el módulo elástico obtenida de los cilindros y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión (K). Dosificación D1.



**Figura 5-4:** Relación entre el módulo elástico obtenida de los cilindros y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión (K). Dosificación D2.



**Figura 5-5:** Relación entre el módulo elástico obtenida de los cilindros y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión (K). Dosificación D3.



De acuerdo con las Figuras 5-3, 5-4 y 5-5, los valores encontrados de K en promedio están del orden de 4164, inferior al determinado en el Reglamento NSR-10 de 4700, el cual es un valor estándar para emplearlo en el diseño. Sin embargo, si se tiene en cuenta que para UHPC el  $E_c$  se encuentra entre 40000 - 50000 MPa y  $f'_c = 150$  MPa, el valor de K debería estar ente 3266 – 4083.

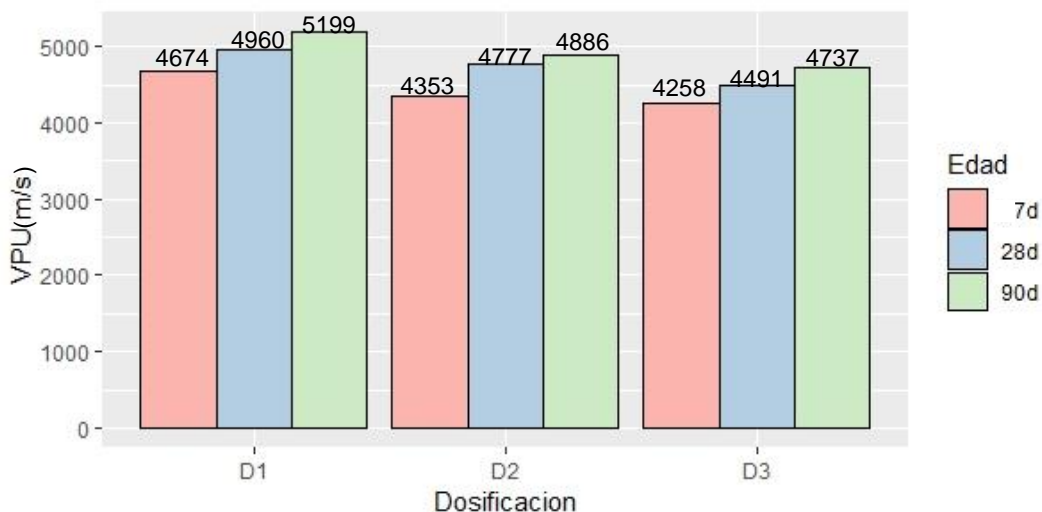
Por otro lado, si experimentalmente se tiene que los valores de  $K$  son menores a los sugeridos por el Reglamento NSR-10, se tiene que el módulo de elasticidad utilizado para el diseño estructural se está tomando superior al que realmente podría desarrollar el material, por lo tanto, los resultados tanto de derivas, deflexiones y ductilidad del material se pueden estar sobreestimando.

### 5.3.1 Velocidad de pulso ultrasónico

La velocidad de pulso ultrasónico se midió a las edades de 7, 28 y 90 días. En la Figura 5-6, se observan los valores de las velocidades de pulso, registradas para cada una de las dosificaciones en las diferentes edades de ensayo.

De acuerdo con estos resultados, se observa en los valores de esta propiedad un aumento constante a lo largo de las diferentes edades de ensayo encontrándose mejor comportamiento en la dosificación de control seguida por la dosificación D2. De acuerdo con lo reportado en [27] sólo se encontró referencia a esta propiedad en dosificaciones adicionadas con humo de sílice, concordando en este mejoramiento con lo reportado en [82].

**Figura 5-6:** Resultados velocidad de pulso ultrasónico.



De otro lado, existen unos criterios de aceptación del concreto con base en la medición de la velocidad de pulso ultrasónico, cuya clasificación se basa en categorías delimitadas por intervalos de velocidad, en la Tabla 5-8, se pueden observar estos criterios de los estudios realizados por [27].

**Tabla 5-8** Clasificación del concreto de acuerdo con los valores de velocidad de pulso ultrasónico [27].

Velocidad ultrasónica V (m/s)	Clasificación del concreto
V > 4575	Excelente
3660 < V < 4575	Bueno
3050 < V < 3660	Cuestionable
2135 < V < 3050	Pobre
V < 2135	Muy pobre

De acuerdo con la Figura 5-6 a partir de los 7 días, todas las dosificaciones presentan una clasificación del concreto como bueno, pasando a excelente las dosificaciones D1 y D2 a partir de los 28 días y la D3 a partir de los 90 días, indicando la densificación y la homogeneidad de los materiales, lo cual coincide con los valores de VDP obtenido, donde la dosificación D1 presenta mejor acomodo de partículas, producido posiblemente por el tamaño de las partículas de cemento y humo de sílice.

A continuación, se presentan en la Tabla 5-9, los indicadores para los valores obtenidos del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico para las tres dosificaciones ensayadas.

**Tabla 5-9** Relación entre los valores de velocidad de pulso ultrasónico para cada dosificación con respecto a la muestra control.

	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	
	D2/control	D3/control
<b>7 d</b>	0.93	0.91
<b>28 d</b>	0.96	0.91
<b>90 d</b>	0.94	0.91

Analizando los indicadores de la Tabla 5-9 se encuentra que hay un mejor comportamiento de la dosificación D2, ya que los valores se acercan más a la dosificación de control, frente a la D3, cuyos valores son menores en un 9%.

Analizando los resultados estadísticamente mediante un modelo Anova a dos vías, a continuación se presenta la Tabla 5-10, con el análisis Anova, correspondiente al modelo estadístico antes planteado, en el cual se estudian simultáneamente los efectos de la edad y las dosificaciones.

**Tabla 5-10** Análisis de varianza de la velocidad de pulso ultrasónico.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosificación	2	990426	495213	40.974	5.07e-07 ***
Edad	2	988893	494446	40.911	5.12e-07 ***
Dosificación: Edad	4	29820	7455	0.617	0.657
Residuals	16	193377	12086		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

De la Tabla 5-10 de Análisis de Varianza se concluye que:

Se rechaza la significancia de la interacción de los factores dosificación-edad al presentar un P-value superior a 0.05.

Se comprueba la significancia del factor edad, y del factor dosificación, al presentar ambos valores del P-value por debajo del 0.05.

Con los resultados anteriores, se determina que la sustitución parcial de materiales cementantes, al igual que la edad, producirán tasas promedio diferentes en la variable respuesta a la velocidad de pulso ultrasónica.

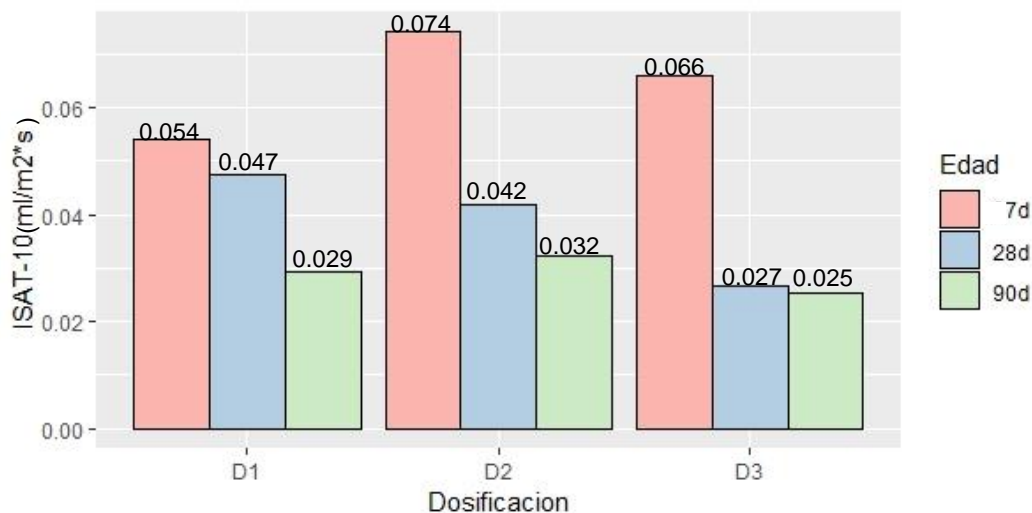
## 5.4 Propiedades de durabilidad de las dosificaciones

### 5.4.1 Absorción superficial inicial (ISAT)

Los resultados indican que todas las muestras tienen una reducida absorción, disminuyendo a lo largo de las diferentes edades de curado. La dosificación D1 presenta menores valores que la D2 y D3 para los primeros 7 días del ensayo, sin embargo a los 28 y 90 días, las dosificaciones D2 y D3 superan a la de control, esto posiblemente se debe a que los poros superficiales se van saturando de agua y la absorción es más lenta.

En la Figura 5-7, se encuentran consignados los datos de las lecturas tomadas a los 10 minutos, para cada una de las dosificaciones evaluadas y para las diferentes edades de curado.

**Figura 5-7:** Ensayo de absorción superficial inicial – 10 minutos.



Analizando los resultados estadísticamente mediante un modelo Anova a dos vías, a continuación se presenta la Tabla 5-11, con el análisis Anova, correspondiente al modelo estadístico antes planteado, en el cual se estudian simultáneamente los efectos de la edad y las dosificaciones.

**Tabla 5-11:** Anova tasa de absorción superficial inicial a 10 minutos.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosificación	2	0.000092	0.0000458	0.104	0.9015
Edad	2	0.003759	0.0018797	4.283	0.0354 *
Dosificación: Edad	4	0.002280	0.0005700	1.299	0.3177
Residuals	14	0.006144	0.0004388		

---

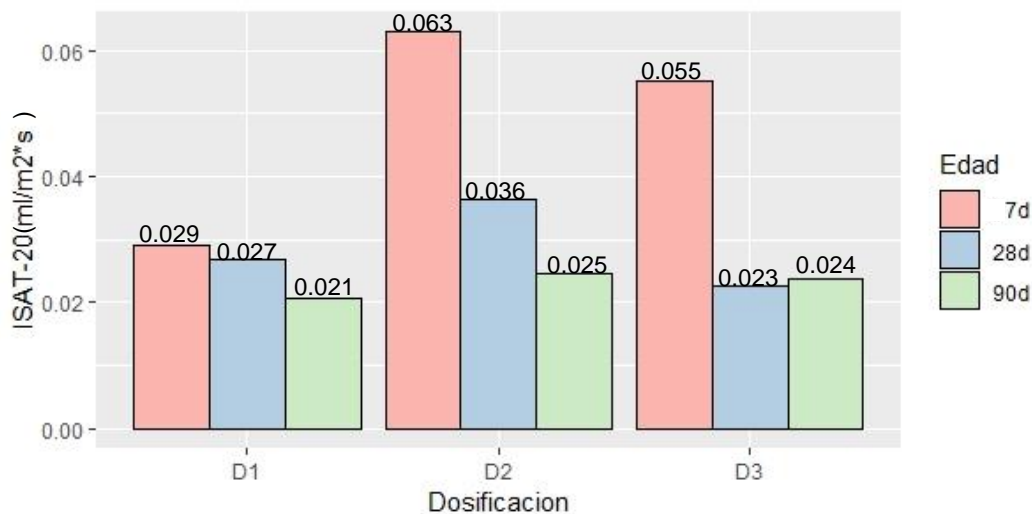
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

De la Tabla 5-11 de Análisis de Varianza se concluye que:

Se comprueba que la interacción de los factores dosificación-edad y el factor dosificación no son significativos (P-value superior a 0.05). Por el contrario se aprecia que el factor edad es significativo al presentar un P-value inferior al 0.05, concluyendo que los diferentes tipos de material usados con edades diferentes, no implican tasas promedio diferentes de la absorción superficial a 10 min.

En la siguiente Figura 5-8, se presentan los datos de tasa inicial de absorción para los 20 minutos y todas las edades de ensayo. De acuerdo con los datos obtenidos, a mayor tiempo de exposición de la muestra al ensayo, esta absorbe menos cantidad de agua, debido a que los poros superficiales se van saturando.



**Figura 5-8:** Ensayo de absorción superficial inicial – 20 minutos.

Analizando los resultados estadísticamente mediante un modelo Anova a dos vías, a continuación se presenta la Tabla 5-12, con el análisis Anova, correspondiente al modelo estadístico antes planteado, en el cual se estudian simultáneamente los efectos de la edad y las dosificaciones.

**Tabla 5-12:** Anova tasa de absorción superficial inicial a 20 minutos.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosificación	2	0.001684	0.0008421	3.085	0.0776.
Edad	2	0.002188	0.0010942	4.009	0.0420 *
Dosificación: Edad	4	0.001066	0.0002664	0.976	0.4516
Residuals	14	0.003821	0.0002730		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

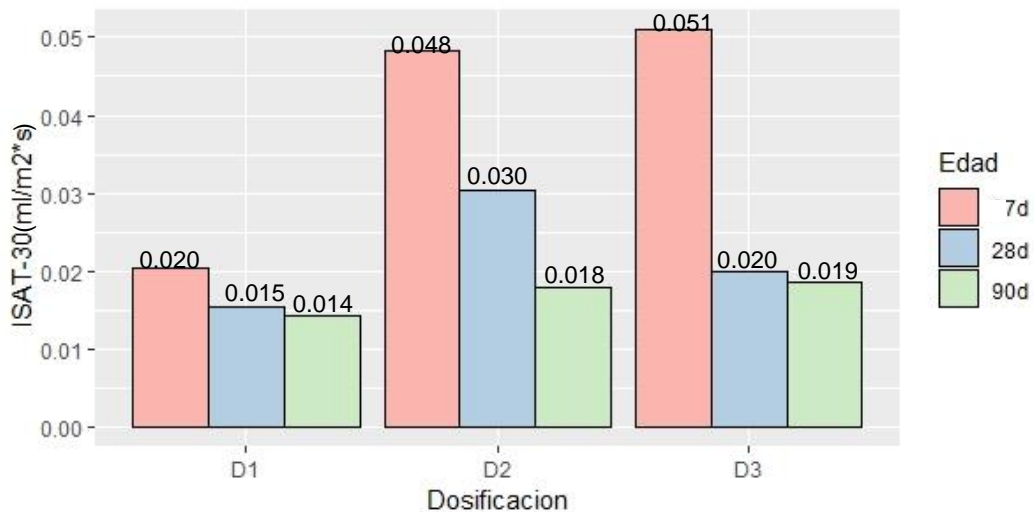
De la Tabla 5-12 de Análisis de Varianza se concluye que:

El valor del P-value para el factor dosificación se encuentra en 0.776, lo cual, si bien es superior al 0.05 adoptado, es inferior al 0.1 (criterio ampliamente adoptado también en ANOVA) por lo que podríamos concluir que este factor podría tener algo de relevancia en la variable respuesta.

Se comprueba la relevancia del factor edad, al presentar un P-value inferior al 0.05. Por otro lado, se comprueba que la interacción entre el factor edad y el factor dosificación no es significativa. Con los resultados anteriores, se determina que la interacción entre los dos factores dosificación y edad, no producirán tasas promedio diferentes en la variable respuesta a la absorción superficial inicial.

En la siguiente Figura 5-9, se presentan los datos de tasa inicial de absorción para los 30 minutos y todas las edades de ensayo. De acuerdo con los datos obtenidos, a mayor tiempo de exposición de la muestra al ensayo, esta absorbe menos cantidad de agua, debido a que los poros superficiales se van saturando.

**Figura 5-9:** Ensayo de absorción superficial inicial – 30 minutos.



Analizando los resultados estadísticamente mediante un modelo Anova a dos vías, a continuación se presenta la Tabla 5-13, con el análisis Anova, correspondiente al modelo estadístico antes planteado, en el cual se estudian simultáneamente los efectos de la edad y las dosificaciones.

**Tabla 5-13:** Anova efecto de la edad en la tasa de absorción superficial inicial.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosificación	2	0.0012357	0.0006179	4.681	0.0277 *
Edad	2	0.0005030	0.0002515	1.906	0.1854
Dosificación: Edad	4	0.0006873	0.0001718	1.302	0.3167
Residuals	14	0.0018478	0.0001320		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

De la Tabla 5-13 de Análisis de Varianza se concluye que:

El único factor que presenta un valor del P-value inferior al 0.05 es el factor dosificación, por lo tanto, este es el único factor relevante respecto a la absorción inicial medida a los 30 minutos.

A continuación se presenta en la Tabla 5-14, los indicadores para los valores obtenidos de del ensayo de absorción superficial inicial ISAT para las tres dosificaciones ensayadas.

**Tabla 5-14** Relación entre los valores de absorción superficial inicial para cada dosificación con respecto a la muestra control.

ABSORCIÓN SUPERFICIAL INICIAL (ISAT)		
10min		
	D2/control	D3/control
<b>7 d</b>	1.37	1.22
<b>28 d</b>	0.88	0.56
<b>90 d</b>	1.10	0.86
20 min		
<b>7 d</b>	2.17	1.90
<b>28 d</b>	1.36	0.85
<b>90 d</b>	1.20	1.15
30 min		
<b>7 d</b>	2.37	2.50
<b>28 d</b>	1.98	1.31
<b>90 d</b>	1.25	1.30

Los indicadores para la absorción superficial presentan valores mayores que la unidad para las dosificaciones D2 y D3 en los primeros 7 días. Esta propiedad mejora su comportamiento después de los 20 minutos. Los valores tienden a disminuir con la edad del ensayo presentando mejor comportamiento en la D3 lo cual es consistente con un mejor empaquetamiento de las partículas con respecto a la muestra D2.

A partir de los resultados a 10 min, 20 min y, 30 min, obtenidos en el ensayo ISAT para las diferentes dosificaciones de concreto, es posible calificar la absorción del concreto, tomando como base, los valores presentados en la Tabla 5-15.

**Tabla 5-15:** Clasificación de la absorción capilar según valor de ISAT (ml/m<sup>2</sup>.s)

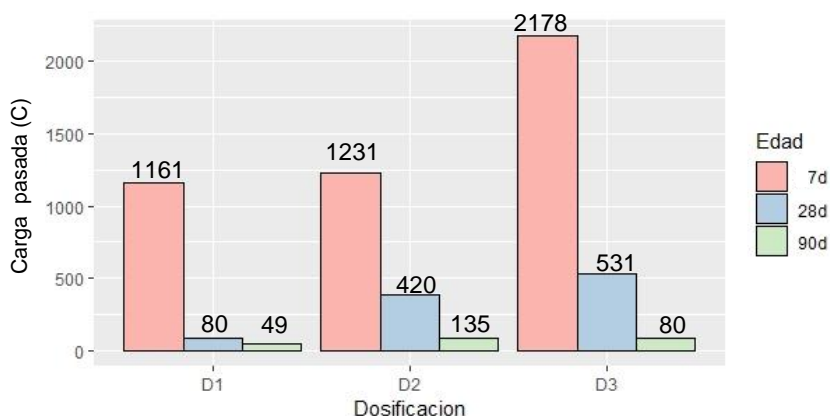
Absorción del concreto	Tiempo desde el inicio del ensayo			
	10 min	30 min	1 hora	2 horas
<b>Alta</b>	>0.50	>0.35	>0.20	>0.15
<b>Media</b>	0.25-0.50	0.17-0.35	0.10-0.20	0.07-0.15
<b>Baja</b>	<0.25	<0.17	<0.10	<0.07

Basados en los valores presentados en esta Tabla 5-15, se puede concluir que en general todas las dosificaciones de concreto evaluadas en esta investigación, tienen un buen comportamiento, clasificándolas dentro de una absorción baja.

#### 5.4.2 Permeabilidad a los cloruros

En la Figura 5-10, se presentan los resultados encontrados de carga pasada, C para las diferentes dosificaciones y a las diferentes edades de ensayo.

**Figura 5-10:** Resultados de la permeabilidad al ión cloruro de las diferentes dosificaciones.



Se observa un buen comportamiento de las dosificaciones bajo estudio, ya que en todas las edades de ensayo, y para todas las dosificaciones, se presenta una reducción drástica, de la permeabilidad ante el paso de este ión, siendo el mejor comportamiento el de la dosificación de control en las primeras edades. pero como se puede observar esta fue disminuyendo a lo largo del tiempo siendo prácticamente similar en todas las muestras a los 90 días, esto coincide con lo encontrado por [75] en donde se hace una sustitución parcial del material cementicio por humo de sílice y se obtuvieron valores inferiores a 100 Coulombs lo cual indica que la carga que pasa es insignificante; este material puede considerarse apto para el uso en estructuras que pueden estar sometidas a esta agresión; por ejemplo estructuras en zonas costeras.

A continuación, se presentan en la Tabla 5-16, los indicadores para los valores obtenidos de del ensayo de permeabilidad de cloruros para las tres dosificaciones.

**Tabla 5-16** Relación entre los valores de permeabilidad de cloruros para cada dosificación con respecto a la muestra control.

PERMEABILIDAD DE CLORUROS		
	D2/control	D3/control
<b>7 d</b>	0.94	0.53
<b>28 d</b>	0.19	0.15
<b>90 d</b>	0.37	0.61

Los indicadores para permeabilidad a los cloruros, presentaron un mejor desempeño con la edad de curado mostrando una tendencia a disminuir significativamente, las dosificaciones D2 y D3 a los 90 días se acercan mucho a la dosificación D1, lo cual, de acuerdo con lo encontrado en [12] se puede atribuir a que el carbonato de calcio y el polvo de vidrio mejora el proceso de hidratación de las dosificaciones, lo que condujo a un relleno de partículas más denso y con menos vacíos interconectados.

Analizando los resultados estadísticamente mediante un modelo Anova a dos vías, a continuación se presenta la Tabla 5-17, con el análisis Anova, correspondiente al modelo estadístico antes planteado, en el cual se estudian simultáneamente los efectos de la edad y las dosificaciones.

**Tabla 5-17:** Anova permeabilidad al ión cloruro.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosificación	2	835370	417685	22.80	5.62e-05 ***
Edad	2	7509238	3754619	204.93	1.48e-10 ***
Dosificación: Edad	4	737970	184493	10.07	0.000616 ***
Residuals	13	238180	18322		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

De la Tabla 5-17 de Análisis de Varianza se concluye que:

De la Tabla ANOVA se desprende que tanto los factores dosificación y edad, así como la interacción de ambos factores son significativos, al presentar P-values inferiores a 0.05. Con los resultados anteriores, se determina que los factores dosificación y edad, al igual que la interacción entre ambos, producirán tasas promedio diferentes en la variable

respuesta a la absorción superficial inicial. Lo cual permite afirmar que la edad de curado beneficia la disminución de los valores de esta propiedad.

A continuación, los valores de carga que pasa se comparan con los datos suministrados en la ASTM C1202, en donde se presenta un indicativo de la permeabilidad del concreto ante el ión cloruro, tal como se observa más adelante en la Tabla 5-18.

Al observar los valores encontrados de permeabilidad en las diferentes dosificaciones, se encuentra que todas las dosificaciones presentan una permeabilidad al ión cloruro baja en los primeros 7 días, siendo la más alta la dosificación D3, la cual incluso llegó a ser moderada. Sin embargo, pasados los 28 días y hasta los 90 días, hay una caída de la carga que pasa C, de este modo se clasifica como muy baja o insignificante.

**Tabla 5-18:** Clasificación del concreto de acuerdo con el paso de coulombs, (ASTM-C1202, 2012)

<b>Carga transmitida (Coulombs)</b>	<b>Permeabilidad al ión cloruro</b>
<b>&gt;4000</b>	Alto
<b>2000-4000</b>	Moderado
<b>1000-2000</b>	Bajo
<b>100-1000</b>	Muy bajo
<b>&lt;100</b>	Insignificante

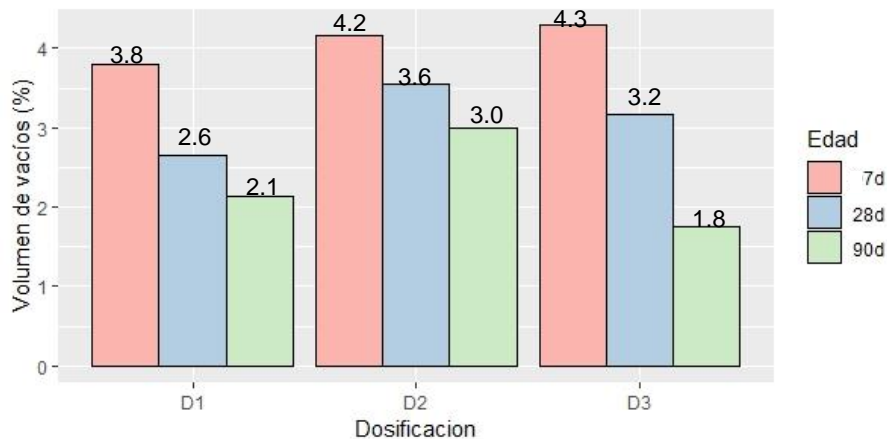
### 5.4.3 Porcentaje de vacíos en concreto endurecido

En general, todas las muestras tienen una absorción baja, la cual va disminuyendo a lo largo de las diferentes edades de curado. Se presenta una tendencia de disminución mayor de los valores de esta propiedad en el tiempo, para la muestra control y la muestra adicionada polvo de vidrio de 28  $\mu\text{m}$  y 7  $\mu\text{m}$ . Todos los concretos con 90 días de curado, presentan un volumen de vacíos menor al 5 %.

Asimismo se observa que con el tiempo disminuye el porcentaje de porosidad, esto es debido a que incrementa la hidratación, y por lo tanto la mayoría de los poros serán reducidos a un tamaño pequeño (100 nm o menos) y también perderán sus interconexiones, de manera que la permeabilidad disminuirá [27].

En la Figura 5-11, se presentan los resultados encontrados de volumen de vacíos, para las diferentes dosificaciones y a las diferentes edades de ensayo.

**Figura 5-11** Volumen de vacíos para las diferentes edades de las dosificaciones.



Se observa un mejor comportamiento a los 90 días para la dosificación D3, presentando incluso valores inferiores que la muestra de control debido a la contribución de las adiciones en el efecto de relleno, probablemente debido a la modificación de la microestructura de los concretos que las contienen y al curado, que al hidratar el cemento crea una matriz más densa, con un menor volumen de poros capilares, disminuyendo así la permeabilidad [27].

Por otro lado, la formación de cristales de CSH a través de la reacción de la portlandita con los materiales cementantes suplementarios podría aumentar la eficiencia para llenar espacios sin dejar que los poros se interconecten entre sí, por lo tanto eso explica la disminución del volumen de vacíos en el tiempo [27].



Al comparar con los resultados obtenidos mediante el ensayo de ISAT la dosificación D3 presenta menor absorción superficial a los 90 días para los primeros 10 min del ensayo que la D2 y D3, lo cual corresponde a un menor porcentaje de vacíos obtenido para la dosificación D3 a los 90 días. Sin embargo para las tres dosificaciones los valores disminuyen durante el tiempo del ensayo.

A continuación, se presentan en la Tabla 5-19 los indicadores para los valores obtenidos del ensayo de densidad, absorción y vacíos para las tres dosificaciones ensayadas.

**Tabla 5-19** Relación entre los valores de volumen de vacíos para cada dosificación con respecto a la muestra control.

	VOLUMEN DE VACÍOS	
	D2/control	D3/control
<b>7 d</b>	0.91	0.88
<b>28 d</b>	0.74	0.84
<b>90 d</b>	0.71	1.21

De acuerdo a los indicadores de la Tabla 5-19, se tiene que el volumen de vacíos disminuye con el tiempo, donde para la dosificación D2 se consigue hasta un 90% los primeros 7 días, seguida muy de cerca por la D3 con respecto a la dosificación de control, sin embargo la D3 mejora su comportamiento después de 90 días, comparada con la D2; lo anterior se puede relacionar con lo obtenido en el ensayo de permeabilidad a los cloruros donde se obtiene mejor comportamiento para la D3 a los 90 días.

Analizando los resultados estadísticamente mediante un modelo Anova a dos vías, a continuación se presenta la Tabla 5-20, con el análisis Anova, correspondiente al modelo estadístico antes planteado, en el cual se estudian simultáneamente los efectos de la edad y las dosificaciones.

**Tabla 5-20** Anova volumen de vacíos después de inmersión y ebullición.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosificación	2	1.300	0.650	18.723	0.000149 ***
Edad	2	10.007	5.004	144.158	1.34e-09 ***
Dosificación: Edad	4	1.235	0.309	8.898	0.001093 **
Residuals	13	0.451	0.035		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

De la Tabla 5-20 se aprecia que tanto los factores dosificación y edad, como la interacción entre ambos son significativos respecto a la variable volumen de vacíos. Con los resultados anteriores, se determina que la sustitución parcial de cemento por los materiales cementantes suplementarios analizados, al igual que la interacción entre los dos factores dosificación y edad, producirán tasas promedio diferentes en la variable respuesta a la absorción superficial inicial.

De otro lado, de acuerdo con el Manual de Inspección, “Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de concreto Armado (CYTED)”, Tabla 5-21, se puede afirmar que los concretos analizados presentan la característica de un concreto de buena calidad y compacidad por tener una porosidad menor al 10 %, a los 28 días de curado y la tendencia indica que este valor sigue disminuyendo.

**Tabla 5-21** Calidad del concreto relacionada a porcentaje de vacíos.

Porosidad %	Tipo de Concreto
<10	Concreto de buena calidad y compacto
10-15	Buen concreto, pero permeable y no adecuado para ambientes agresivos
>15	Características de concretos muy permeables e inadecuados para proteger la armadura a largo plazo

## 5.5 ESTIMACIÓN DE COSTOS

Dentro del alcance de esta investigación se incluyó el análisis del costo de los materiales para producir las tres dosificaciones utilizadas, estos se muestran en la Tabla 5-22; basados en un metro cúbico de concreto.

**Tabla 5-22** Costo de las dosificaciones

MATERIAL	D1	D2	D3
	costo	costo	costo
Cemento Concretero	\$298,291	\$217,000	\$217,000
Humo de Sílice Toxement	\$543,400	\$200,000	\$200,000
Superplastificante MasterGlenium	\$211,680	\$171,840	\$168,000
Arena Sílicea 600 $\mu$ m	\$166,854	\$155,632	\$177,766
Polvo de vidrio 28 $\mu$ m	-	\$46,497	\$25,290
Polvo de vidrio 7 $\mu$ m	-	-	\$37,510
Carbonato de Calcio Betocarb Ultra Fino	-	\$64,273	\$29,608
<b>TOTAL</b>	<b>\$1,220,225</b>	<b>\$855,242</b>	<b>\$855,174</b>

De acuerdo con la Tabla 5-22 se tiene que la dosificación de control (D1), por tener un contenido de cemento más alto, es la que representa mayor costo de producción, estando un 30% por encima del costo de las dosificaciones D2 y D3.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Los resultados de resistencia a compresión en cubos para las tres dosificaciones fueron en promedio para la edad de 90 días superiores a 150 MPa, por lo cual se puede considerar como concreto tipo UHPC. Con respecto al módulo de elasticidad, se observa la tendencia a aumentar con la edad de curado. Los valores en todas las muestras están por encima de los 40000 MPa a los 7 días, y alcanzan valores por encima de los 50000 MPa a los 28 días para concreto tipo UHPC, de acuerdo con ACI 239 Tabla 4.2.

Por otro lado, en términos generales, se concluye que el porcentaje del 27% de reemplazo parcial de cemento y 63% de humo de sílice con polvo de vidrio y carbonato de calcio en las dosificaciones D2 y D3 se acerca o iguala las propiedades mecánicas respecto a la dosificación control D1.

En propiedades como la velocidad de pulso ultrasónico para las dosificaciones D2 y D3, se observa que los valores obtenidos en los indicadores son cercanos a la muestra control (D1) alcanzando 93 y 91% respectivamente, a las diferentes edades de curado.

Los resultados del volumen de vacíos y absorción inicial en la dosificación D3 presentan valores similares a la muestra de control, y mejoran su comportamiento a los 90 días, superándola. Sin embargo, para las tres dosificaciones, los valores disminuyen manteniendo esta tendencia durante todas las edades de los ensayos.

En el caso de cloruros, se observa mejor desempeño con la edad de curado. La dosificación D3 presenta mejor comportamiento, seguida por la D2. Esto obedece a la baja penetrabilidad de los agresores externos (perjudiciales) en el material UHPC. La

microestructura muy densa es crucial para evitar daños internos, asegurando así una mejor durabilidad.

Los resultados obtenidos en la investigación muestran la viabilidad técnica de la sustitución parcial de cemento con materias primas de menor costo tales como carbonato de calcio y polvo de vidrio. Asimismo, al comparar el precio por  $m^3$  de cada dosificación se encontró que estas son viables y puede significar una oportunidad para la industria de la construcción, pues podría llegar a competir favorablemente en el mercado con otro tipo de dosificaciones para concretos UHPC. Igualmente la reutilización de un residuo industrial como el polvo de vidrio y la disminución en la cantidad de cemento, trae beneficios desde el punto de vista ambiental.

## 6.2 Recomendaciones

Debido a la baja relación agua/binder, se recomienda usar mezcladores de alta energía para integrar adecuadamente los componentes; así como mesa vibratoria para garantizar el menor contenido de aire en la dosificación, debido a que al incluir un superplastificante, este crea una película densa que atrapa las burbujas.

La gran cantidad de materiales cementicios entre ellos el polvo de vidrio que tiene un porcentaje alto de  $Na_2O$ , podría iniciar una reacción álcali - sílice. Por tanto, se recomienda hacer ensayos de cambios volumétricos para evaluar el comportamiento de las dosificaciones.  $m^3$

Siendo la carbonatación una de las patologías más comunes en el concreto, y dado que la profundidad de carbonatación depende de las propiedades físicas de la estructura del concreto endurecido, que controla el transporte del  $CO_2$  a través de la estructura porosa; se recomienda realizar ensayos de carbonatación en el material para evaluar la profundidad del frente de carbonatación con respecto a los recubrimientos recomendados en el Reglamento NSR-10.

Se recomienda realizar un estudio de la evolución microestructural de las dosificaciones (pastas de las dosificaciones) a través de las técnicas de Difracción por Rayos X (DRX por sus siglas en inglés) y su observación por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM por sus siglas en inglés) a diferentes edades de curado.

Se recomienda realizar análisis termogravimétrico para estimar el consumo de portlandita a diferentes edades de curado.

## 7. Bibliografía

- [1] J. Abellan, N. Torres, A. Núñez, and J. Fernández, “Influencia del exponente de Fuller, la relación agua conglomerante y el contenido en policarboxilato en concretos de muy altas prestaciones,” in *IV Congreso Internacional de Ingeniería Civil*, 2018.
- [2] N. A. Soliman and A. Tagnit-Hamou, “Using particle packing and statistical approach to optimize eco-efficient ultra-high-performance concrete,” *ACI Mater. J.*, vol. 114, no. 6, pp. 847–858, 2017.
- [3] E. Ghafari, H. Costa, E. Nuno, and B. Santos, “RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, no. September, pp. 375–383, 2014.
- [4] C. Schmidt and M. Schmidt, ““Whitetopping” of Asphalt and Concrete Pavements with thin layers of Ultra-High-Performance Concrete - Construction and economic efficiency,” in *3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, no. 19, M. S. E. F. C. G. S. Fröhlich and S. Piotrowski, Eds. Kassel, Germany: Kassel University, 2012, pp. 921–927.
- [5] S. Abbas, M. L. Nehdi, and M. A. Saleem, “Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 10, no. 3, pp. 271–295, 2016.
- [6] A. Tagnit-Hamou, N. A. Soliman, and A. Omran, “Green Ultra - High - Performance Glass Concrete,” vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2016.
- [7] P. Richard and M. Cheyrezy, “Composition of reactive powder concretes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, no. 7, pp. 1501–1511, 1995.
- [8] F. De Larrard and T. Sedran, “Mixture-proportioning of high-performance concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 11, pp. 1699–1704, 2002.
- [9] J. Abellán, N. Torres, A. Núñez, and J. Fernández, “CONCRETOS DE MUY ALTAS PRESTACIONES REFORZADOS CON FIBRAS: ESTADO DEL ARTE, APLICACIONES Y POSIBILIDADES EN EL MERCADO LATINOAMERICANO.,” in *XXXVIII Jornadas Sudamericanas de ingeniería estructural*, 2018.
- [10] H. Martin-Sanz, E. Chatzi, and E. Brühwiler, “The use of Ultra High Performance

- Fibre Reinforced cement-based Composites in rehabilitation projects: a review,” 2016.
- [11] Z. Li, “ PROPORTIONING AND PROPERTIES OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE MIXTURES FOR APPLICATION IN SHEAR KEYS OF PRECAST CONCRETE BRIDGES,” 2015.
- [12] J. Abellán, J. Fernández, N. Torres, and A. Núñez, “Statistical Optimization of ultra-high-performance glass concrete,” *ACI Mater J*, 2020.
- [13] F. de Larrard and T. Sedran, “Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 24, no. 6, pp. 997–1009, 1994.
- [14] B. A. W. Ragalwar, K. A., H. Nguyen, R. Ranade, W. F. Heard, “Influence of Distribution Modulus of Particle-Size Distribution on Rheological and Mechanical Properties of Ultra-High-Strength SHCC Matrix,” pp. 1–9.
- [15] E. Ghafari and Al., “Optimization of UHPC by Adding Nanomaterials, in Proceedings of Hipermat 2012,” in *3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials*, Kassel Uni., Kassel, Alemania, 2012, pp. 71–78.
- [16] B. Graybeal, “Ultra-High Performance Concrete,” *Fed. Highw. Adm. J.*, vol. 1, no. 38, pp. 1–8, 2011.
- [17] M. Nehdi, S. Abbas, and A. Soliman, “Exploratory study of ultra-high performance fiber reinforced concrete tunnel lining segments with varying steel fiber lengths and dosages,” *Eng. Struct.*, vol. 101, no. March 2016, pp. 733–742, 2015.
- [18] B. A. Graybeal, “Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete,” in *U.S Department of Transportation*, Federal Hi., 2006.
- [19] Z. B. Haber, J. F. Munoz, and B. A. Graybeal, “Field Testing of an Ultra-High Performance Concrete Overlay (No. FHWA-HRT-17-096),” 2017.
- [20] A. Tagnit-Hamou, N. Soliman, and A. Omran, “Green Ultra - High - Performance Glass Concrete,” *First Int. Interact. Symp. UHPC – 2016*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2016.
- [21] M. Schmidt and J. Stark, *Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen*. 2008.



- 
- [22] E. Fehling, M. Schmidt, and S. Sturwald, *Ultra High Performance Concrete*, vol. 53. 2008.
- [23] J. E. Funk and D. Dinger, *“Predictive process control of crowded particulate suspensions: Applied to ceramic manufacturing.”* 1994.
- [24] D. C. Montgomery, *“Design and analysis of experiments.”* New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [25] G. Derringer and R. Suich, *“Simultaneous Optimization of Several Response Variables,” J. Qual. Technol.*, vol. 21, no. 4, pp. 214–219, 1980.
- [26] J. Abellán, N. Torres, A. Núñez, and J. Fernández, *“Quality optimization of low-cost UHPC using micro limestone powder and glass flour,” Comput. Concr.*
- [27] N. Torres Castellanos, *“ESTUDIO EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO DE CONCRETOS ADICIONADOS CON CATALIZADOR DE CRAQUEO CATALÍTICO USADO (FCC) NANCY,”* Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [28] E. Camacho Torregosa, *“Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties,”* Polytechnic University of Valencia, Spain, 2013.
- [29] AFGC and SETRA, *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes - Recommendations*, Associatio. 2013.
- [30] ACI Committe 239, *“ACI – 239 Committee in Ultra-High Performance Concrete.”* ACI, Toronto, 2018.
- [31] A. F. N. O. R. Essai, D. Indice, and B. Global, *“National addition to Eurocode 2 — Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC),”* vol. 33, no. 1992. pp. 35–47, 2000.
- [32] P. Serna Ros, J. Á. López Martínez, and E. Camacho Torregosa, *“UHPFRC : De los componentes a la estructura,”* in *Simposio Latinoamericano sobre Concreto Autocompactante*, 2012, no. 1, pp. 1–21.
- [33] J. Abellán *et al.*, *“Ultra high preformance fiber reinforced concrete: state of the art, applications and possibilities into the latin american market,”* in *XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, 2018.
- [34] O. Büyükoztürk and D. Lau, *“High performance concrete: fundamentals and application,”* in *Proceedings of the International Conference on New Developments in Concrete Technologies*, 2002, pp. 177–198.

- [35] Man-Chung Tang, *High Performance Concrete – Past, Present and Future*, no. 3. 2004.
- [36] D. Carnovale and F. J. Vecchio, “Effect of Fiber Material and Loading History on Shear Behavior of Fiber-Reinforced Concrete,” no. 111, 2014.
- [37] F. Toutlemonde and J. Resplendino, *Designing and Building with UHPFRC*. 2013.
- [38] C. Wang and Al., “Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34(4), pp. 538–544, 2012.
- [39] P. K. Mehta and R. W. Burrows, “Building durable structures in the 21 st century,” *Indian Concr. J.*, pp. 437–443, 2001.
- [40] B. Graybeal and M. Davis, “Cylinder or Cube : Strength Testing of 80 to 200 Fiber-Reinforced Concrete Cylinder or Cube : Strength Testing of 80 to 200 MPa ( 11 . 6 to 29 ksi ) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete,” no. January, 2014.
- [41] C. Magureau, I. Sosa, C. Negrutiu, and H. Bogdan, “Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete,” *ACI Mater. J.*, vol. 109, no. 3, pp. 177–183, 2012.
- [42] M. Skazlic, D. Bjegovic, and M. Serdar, “Influence of test specimens geometry on compressive strength of ultra-high performance concrete.,” in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2008*, pp. 295–301.
- [43] M. Ahlborn, D. Harris, L. Misson, and E. Peuse, *Strength and Durability Characterization of Ultra-High Performance Concrete Under Variable Curing Conditions*. 2011.
- [44] V. Y. Garas, K. E. Curtis, and L. F. Kahn, “Creep of UHPC in tension and compression: Effect of thermal treatment,” *Cem. Concr. Compos.*, no. 34, pp. 493–502, 2012.
- [45] J. Zhang, X. Liu, Y. Yuan, and H. Mang, “Multiscale modeling of the effect of the interfacial transition zone on the modulus of elasticity of fiber-reinforced fine concrete.,” *Comput Mech*, pp. 37–55, 2015.
- [46] E. Fehling, *Ultra high performance concrete (UHPC)*, no. 3. 2004.
- [47] D. Wang, C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, Z. Huang, and Z. Fang, “Durability of an ultra high

- performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under progressive aging,” *Cem. Concr. Res.*, no. 55, 2015.
- [48] Z. B. Haber and B. A. Graybeal, “Lap-Spliced Rebar Connections with UHPC Closures,” *ASCE J. Bridg. Eng.*, 2018.
- [49] B. Moser, C. Pfeifer, and J. Stark, *Durability and microstructural development during hydration in ultrahigh performance concrete*. London, UK: Taylor & Francis, 2009.
- [50] H. Russel, G and B. a. Graybeal, “Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community,” no. June, p. 171, 2013.
- [51] R. Hamid, K. M. Yusof, and M. F. M. Zain, “A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume.,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 1, no. 24, pp. 94–98, 2010.
- [52] R. Sri Ravindrarajah, “Strength evaluation of high-strength concrete by ultrasonic pulse velocity method,” in *Australian Institute of Non-Destructive Testing National Conference*, 1992.
- [53] J. C. Walraven, *High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes*, Materials. 2009.
- [54] P. Racky, “Cost-effectiveness and sustainability of UHPC,” in *Proceedings of the International Symposium on High Performance Concrete*, 2004, pp. 797–805.
- [55] P. Hajek and C. Fiala, “Environmentally optimized floor slabs using UHPC-contribution to sustainable building.,” in *Proceeding of second international symposium on ultra high performance concrete, Germany.*, 2008.
- [56] P. Aitcin, “Cements of yesterday and today—concrete of tomorrow,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 9, no. 30, pp. 1349–1359, 2000.
- [57] M. Schmidt and T. Teichmann, “Development of an ultra high performance concrete for the company SW Umwelttechnik.” Kassel, Germany, 2007.
- [58] H. Yazici and Al., “Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete.,” vol. 87(12), pp. 2401–2407, 2008.
- [59] V. Vaitkevicius, E. Šerelis, and H. Hilbig, “The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete,” vol. 68, pp. 102–109, 2014.

- [60] E. Camacho Torregrosa, "Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties," 2013.
- [61] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Breugel, A. L. A. Fraaij, and B. Danh, "The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 2030–2035, 2011.
- [62] N. A. Soliman and A. Tagnit-Hamou, "Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC," *Constr. Build. Mater.*, vol. 145, pp. 243–252, 2017.
- [63] P. K. Mehta, "Global concrete industry sustainability," *ACI Mater J.*, vol. 2, pp. 45–48, 2009.
- [64] F. Puertas, H. Santos, M. Palacios, and S. Martínez-Ramírez, "Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes," *Adv. Cem. Res.*, vol. 17, no. 2, pp. 77–89, 2005.
- [65] E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, A. Portugal, and L. Durães, "Enhanced Durability of Ultra High Performance Concrete by Incorporating Supplementary Cementitious Materials," *Second Int. Conf. Microstructural-related Durab. Cem. Compos.*, no. November 2014, pp. 11–13, 2012.
- [66] C. Pedrajas, V. Rahhal, and R. Talero, "Determination of characteristic rheological parameters in Portland cement pastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 51, pp. 484–491, 2014.
- [67] M. López Villamarín, D. Osorio Gamboa, "INFLUENCIA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO (UHPC)," Pontificia Universidad Javeriana, 2015.
- [68] Torres, N., Izquierdo, S., Torres, J., Mejía, R., Resistance to chlo-ride ion penetration and carbonation of blended concrete with a residue of the petrochemical industry., *Ingeniería e Investigación*, Vol. 34, No. 1, April, 2014, pp. 11 – 16.
- [69] Rivera, Gerardo. *Tecnología del Concreto y Mortero*. Cali Valle del Cauca: Unicauca., 2015, pag. 155.

- 
- [70] J. Ortiz Polanco, "ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CONCRETOS DE ULTRA-ALTAS PRESTACIONES Y EVALUACIÓN DE COPRODUCTOS INCORPORADOS A LA MATRIZ CEMENTÍCIA: CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ Y ESCORIA DE ALTO HORNO," Pontificia Universidad Javeriana, 2017.
- [71] A. Machuca Quintero, P. Sarmiento Marcano, "EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN VIGAS EN VOLADIZO CON UHPC SOMETIDAS A CARGAS CÍCLICAS," Pontificia Universidad Javeriana, 2016.
- [72] H.-W. Röth., "Production of Calciumcarbonate based fine fillers for UHPC," in *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel Uni., Kassel, Alemania, 2004, pp. 227–238.
- [73] Shamsad Ahmad, Ibrahim Hakeem & Mohammed Maslehuddin (2015): Development of an optimum mixture of ultra-high performance concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, DOI: 10.1080/19648189.2015.1090925
- [74] Z. Li, "PROPORTIONING AND PROPERTIES OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE MIXTURES FOR APPLICATION IN SHEAR KEYS OF PRECAST CONCRETE BRIDGES," 2015.
- [75] Shamsad Ahmad, Ibrahim Hakeem & Mohammed Maslehuddin (2017): Use of alternative waste materials in producing ultra-high performance concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, DOI: 10.1051/matecconf/20171200
- [76] K. Jayakumar., "Role of Silica fume Concrete in Concrete Technology," in *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel Uni., Kassel, Alemania, 2004, pp. 165–174.
- [77] M. Reyes Suárez, J. Camargo Jimenez, "PLACAS DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO (UHPC) COMO SOLUCIÓN PARA PISOS EN ESTACIONES DE TRANSMILENIO.," Pontificia Universidad Javeriana, 2016.
- [78] Shi, Caijun & Xiao, Jianfan & Wang, Dehui & Zhengyu, Huang & Fang, Zhi. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*. 101. 741-751.

- 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088.
- [79] Abellan, Joaquin & Fernández, Jaime & Castellanos, Nancy. (2020). Properties prediction of environmentally friendly ultra-high-performance concrete using artificial neural networks. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 10.1080/19648189.2020.1762749.
- [80] De Larrard, F. 1999. "Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach." in *Modern concrete technology series*.
- [81] Nassif, Hani & Najm, Husam & Suksawang, Nakin. (2005). Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC. *Cement and Concrete Composites*. 27. 661-670. 10.1016/j.cemconcomp.2004.12.005.
- [82] Sri Ravindrarajah, R. (1992). Strength evaluation of high-strength concrete by ultrasonic pulse velocity method Paper presented at the Australian Institute of Non-Destructive Testing National Conference, Melbourne (Australia).
- [83] Abellán, J., Fernández, J., Torres, N., Núñez, A., Development of cost-efficient UHPC with local materials in Colombia, in: Proc. Hipermat 2020 - 5th Int. Symp. UHPC Nanotechnol. Constr. Mater., Kassel, Germany, 2020: pp. 97–98.
- [84] The European Project Group, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete," 2005, 63 pp.

## 8. Anexos

### 8.1 Datos Resultados Ensayo Resistencia a Compresión.

Tabla 8-1 Resultados ensayo resistencia a compresión.

Resistencia a la compresión f'c				
Dosificación	Edad	Cubos (MPa)	Promedio	Desviación
D1	7	119	120	0.70
D1	7	121		
D1	28	162	167	3.91
D1	28	166		
D1	28	172		
D1	90	167	168	0.79
D1	90	167		
D1	90	169		
D1	90	168		
D2	7	90	97	6.4
D2	7	103		
D2	28	162	154	7.5
D2	28	144		
D2	28	154		
D2	90	158		
D2	90	163	161	2.76
D2	90	164		
D3	7	83	84	1.2
D3	7	85		
D3	28	144	145	3.3
D3	28	141		
D3	28	149		
D3	90	158	153	13.36
D3	90	166		
D3	90	135		

## 8.2 Datos Resultados Ensayo Módulo de Elasticidad

**Tabla 8-2** Resultados ensayo módulo de elasticidad.

<b>Módulo de Elasticidad</b>				
<b>Dosificación</b>	<b>Edad</b>	<b>Módulo (MPa)</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación</b>
D1	7	36293	40415	4123
D1	7	44538		
D1	28	47300	48539	3254
D1	28	52996		
D1	28	45320		
D1	90	46205	57810	7693
D1	90	57627		
D1	90	67738		
D1	90	59671		
D2	7	41050	42837	1787
D2	7	44625		
D2	28	42900	44528	2337
D2	28	47833		
D2	28	42852		
D2	90	51414	52423	2075
D2	90	50542		
D2	90	55313		
D3	7	45081	42077	3004
D3	7	39073		
D3	28	37252	44165	8979
D3	28	38399		
D3	28	56846		
D3	90	50111	50862	846
D3	90	50430		
D3	90	52044		



## 8.3 Datos Resultados Ensayo Velocidad de Pulso Ultrasónico

Tabla 8-3 Resultados promedio ensayo velocidad de pulso ultrasónico

Velocidad de Pulso Ultrasónico						
Dosificación	Edad (días)	L (m)	T (s)	Velocidad (m/s)	Promedio	Desviación
D1	7	0.154	3.3E-05	4653	4674	21
D1	7	0.154	3.3E-05	4695		
D1	28	0.148	3.2E-05	4992	4960	49
D1	28	0.153	3.4E-05	4891		
D1	28	0.154	3.2E-05	4998		
D1	90	0.148	3.4E-05	5100	5199	132
D1	90	0.148	3.4E-05	5298		
D1	90	0.149	3.4E-05	5357		
D1	90	0.158	3.9E-05	5041		
D2	7	0.153	3.6E-05	4211	4353	142
D2	7	0.154	3.4E-05	4494		
D2	28	0.138	3.2E-05	4862	4777	67
D2	28	0.152	3.4E-05	4771		
D2	28	0.155	3.4E-05	4699		
D2	90	0.147	3.4E-05	4994	4886	79
D2	90	0.152	3.4E-05	4853		
D2	90	0.150	3.7E-05	4810		
D3	7	0.153	2.9E-05	4264	4258	6
D3	7	0.153	2.9E-05	4252		
D3	28	0.155	3.4E-05	4537	4491	43
D3	28	0.154	3.4E-05	4503		
D3	28	0.15	3.4E-05	4433		
D3	90	0.152	3.5E-05	4872	4737	113
D3	90	0.149	3.4E-05	4743		
D3	90	0.153	3.4E-05	4596		

## 8.4 Datos Resultados Ensayo Tasa De Absorción Inicial (ISAT)

Tabla 8-4 Resultados promedios ensayo ISAT a 10, 20 y 30 min.

Ensayo Tasa Inicial de Absorción (ISAT)										
Dosificación	Edad	ISAT10	ISAT20	ISAT30	Promedio (ml/m <sup>2</sup> *s)	Promedio (ml/m <sup>2</sup> *s)	Promedio (ml/m <sup>2</sup> *s)	Desviación	Desviación	Desviación
D1	7	0.052	0.022	0.020	0.054	0.029	0.020	0.002	0.007	0.000
D1	7	0.056	0.036	0.020						
D1	28	0.046	0.027	0.015	0.047	0.027	0.015	0.001	0.003	0.000
D1	28	0.049	0.023	0.015						
D1	28	0.047	0.031	0.015	0.029	0.021	0.014	0.002	0.010	0.001
D1	90	0.031	0.011	0.015						
D1	90	0.028	0.031	0.013	0.074	0.063	0.048	0.013	0.007	0.000
D2	7	0.062	0.056	0.048						
D2	7	0.087	0.070	0.048	0.042	0.036	0.030	0.007	0.003	0.004
D2	28	0.039	0.035	0.034						
D2	28	0.036	0.034	0.032	0.032	0.025	0.018	0.016	0.014	0.005
D2	28	0.051	0.041	0.026						
D2	90	0.012	0.008	0.015	0.066	0.055	0.051	0.000	0.005	0.000
D2	90	0.051	0.041	0.026						
D2	90	0.034	0.026	0.013	0.027	0.023	0.020	0.013	0.016	0.009
D3	7	0.066	0.050	0.051						
D3	7	0.066	0.060	0.051	0.020	0.010	0.009	0.020	0.021	0.015
D3	28	0.044	0.046	0.031						
D3	28	0.015	0.012	0.020	0.025	0.024	0.019	0.007	0.003	0.005
D3	28	0.020	0.010	0.009						
D3	90	0.020	0.021	0.015	0.020	0.023	0.015	0.001	0.003	0.000
D3	90	0.035	0.028	0.025						
D3	90	0.020	0.023	0.015						

## 8.5 Permeabilidad a los Cloruros

**Tabla 8-5** Resultados promedios ensayo permeabilidad a los cloruros.

<b>Permeabilidad a los Cloruros</b>				
<b>Dosificación</b>	<b>Edad (días)</b>	<b>Coulombs</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación</b>
D2	7	1203.0	1231.5	28.5
D2	7	1260.0		
D2	28	466.0	420.0	146.5
D2	28	572.0		
D2	28	222.0		
D2	28	275.5	134.7	95.1
D2	90	26.2		
D2	90	73.5		
D2	90	163.6		
D3	7	2144.0	2178.5	34.5
D3	7	2213.0		
D3	28	511.0	530.7	18.3
D3	28	526.0		
D3	28	555.0		
D3	90	77.0	80.5	3.5
D3	90	84.0		
D1	7	1422.0	1161.0	261.0
D1	7	900.0		
D1	28	113.0	80.0	33.0
D1	28	47.0		
D1	90	99.0	49.6	49.4
D1	90	0.2		

## 8.6 Porcentaje de vacíos en el concreto endurecido.

**Tabla 8-6** Resultados promedios volumen de vacíos.

Dosificación	Edad (días)	Volumen de vacíos		
		Volumen de vacíos (%)	Promedio	Desviación
D2	7	4.1	4.2	0.1
D2	7	4.2		
D2	28	3.4	3.6	0.1
D2	28	3.7		
D2	28	3.5		
D2	90	2.6	3.0	0.2
D2	90	3.0		
D2	90	3.2		
D2	90	3.1		
D3	7	4.2	4.3	0.1
D3	7	4.4		
D3	28	3.2	3.2	0.0
D3	28	3.1		
D3	28	3.2		
D3	90	1.9	1.8	0.1
D3	90	1.6		
D1	7	3.8	3.8	0.0
D1	7	3.8		
D1	28	2.8	2.6	0.1
D1	28	2.5		
D1	90	2.0	2.1	0.2
D1	90	2.3		