

ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR METACAOLÍN
EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CONCRETOS DE MUY ALTAS PRESTACIONES**

Maria Alejandra Santofimio Vargas

Escuela Colombiana de Ingeniería
Pregrado en Ingeniería Civil
Bogotá, Colombia
2019

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR METACAOLÍN
EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CONCRETOS DE MUY ALTAS PRESTACIONES**

Maria Alejandra Santofimio Vargas

Trabajo Dirigido presentado como requisito para énfasis en estructuras

Director (a):

Ph.D. Nancy Torres Castellanos

Codirector (a):

Ing. Joaquín Abellán García

Línea de Investigación:

Efecto de la sustitución parcial de cemento por metacaolín en concretos de muy altas
prestaciones

Grupo de Investigación:

Centro de Estudios de Materiales y Estructuras

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Facultad en Ingeniería Civil

Ciudad, Colombia

2019

Resumen

El concreto de ultra alto desempeño (UHPC) es uno de los mayores exponentes en la investigación de concretos avanzados en los últimos años. Aunque la mayoría de las veces su costo e impacto ambiental sea elevado, superando el del concreto convencional, el empleo de materiales cementantes suplementarios como el polvo de vidrio reciclado, carbonato cálcico de tamaño medio, arena de sílice, humo de sílice y metacaolín, entre otros, en sustitución parcial del cemento permite crear un UHPC de menor costo y más amigable con el medio ambiente. Adicionalmente, con miras a reducir la cantidad de agua de la mezcla, es común el uso de superplastificantes a base de éter de policarboxilato que permite alcanzar una manejabilidad adecuada.

El principal objetivo del presente proyecto de investigación consistió, por medio de técnicas de diseño de experimentos, en determinar el efecto de la sustitución parcial de cemento por metacaolín para producir concreto de ultra alto desempeño; tomando como base su resistencia a la compresión. Se realizaron pruebas al concreto en estado fresco y endurecido, comprobando así el flujo estático y las resistencias a los 1, 7 y 28 días de edad de las muestras

Los resultados muestran que la adición del metacaolín tiene un efecto positivo en la generación de resistencias iniciales a 1 y 7 días. Sin embargo, su efecto es insignificante en la resistencia a 28 días, mientras que es muy perjudicial en el flujo estático del concreto en estado fresco.

Palabras clave: UHPC, Materiales cementantes suplementarios, metacaolín, diseño de experimentos, análisis de efectos principales

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras.....	1
1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo Principal.....	5
2.2 Objetivos Específicos.....	5
3. ESTADO DEL ARTE	7
3.1 Introducción	7
3.1.1 Propiedades del UHPFRC	7
3.1.2 Composición del UHPFRC.....	9
3.1.3 Densidad de Empaquetamiento y Granulometría del UHPC	10
3.2 Aplicaciones del UHPFRC	13
3.2.1 Experiencia internacional	13
3.2.2 Experiencia en Colombia	16
3.3 Principales desafíos para la implementación del UHPFRC	18
4. METODOLOGÍA	20
4.1 Diseño de experimentos	20
5. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL	22
5.1 Materiales	23
5.2 Diseño de mezcla	27
5.2.1 Mezcla de referencia sin MK	27
5.2.2 Mezclas con MK.....	28
5.3 Normas y procedimientos usados en la práctica	29
6. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN	30
6.1 Resultados experimentales.....	30
6.2 Gráfico de efecto principal de los factores	31
7. CONCLUSIONES	34
8. REFERENCIAS.....	34

Lista de figuras

Figura 1 - Familia del UHPFRC (Serna Ros, López Martínez, & Camacho Torregosa, 2012).....	8
Figura 2 - Dosificación usual de una mezcla de UHPFRC comparada con concreto convencional (Naaman & Wille, 2012).....	9
Figura 3. Esquema de empaquetamiento de partículas en una mezcla de UHPC	10
Figura 4. Efectos de Interacción entre Partículas (De Larrard, 1999)	12
Figura 5. Pasarela de sherbbooke.....	13
Figura 6. Joppa silo para Clinker (2001 Illinois, USA)	14
Figura 7. Pasarela Sakata Mirai	14
Figura 8. Cubierta Peaje Viaducto Millau.....	15
Figura 9. Implementación de UHFRC (ARGOS).....	17
Figura 10. Puente Peatonal en Medellín, Colombia 2017 (360ARGOS)	18
Figura 11. Diseño compuesto central durante 3 factores (A, B y C) en 2 niveles Fuente: (Abellan et al., 2018a).	21
Figura 12. Experiencia práctica	23
Figura 13. Cemento tipo III. Fuente: Ingeniero Joaquín Abellán	24
Figura 14. Humo de sílice. Fuente: Ingeniero Joaquín Abellan	24
Figura 15. Metacaolín. Fuente: Ingeniero Joaquín Abellan.....	24
Figura 16. Micro carbonato. Fuente: Ingeniero Joaquín Abellan.....	25
Figura 17. Harina de vidrio reciclado. Fuente: Ingeniero Joaquín Abellan	25
Figura 18. Arena silicea. Fuente: Ingeniero Joaquín Abellan.....	25
Figura 19. Tamaño de Partícula de los materiales utilizados.	27
Figura 20. Dispersión de la tabla de flujo (a) y cubos de 50 mm y sus moldes utilizados en esta investigación (b).....	30
Figura 21. Efecto del Factor A en 1, 7 y 28 días resistencia a la compresión	31
Figura 22. Efecto del Factor B: en 1, 7 y 28 días resistencia a la compresión	32
Figura 23. Efecto del Factor C: en 1, 7 y 28 días resistencia a la compresión	33
Figura 24. Flujo estático	33

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. aplicaciones de UHPFRC	16
Tabla 2. Características puente peatonal localizada en la avenida Las Vegas (Medellín)	17
Tabla 3. Propiedades físico-químicas de los materiales.	26
Tabla 4. Factores y rango de variación.....	29
Tabla 5. Proporción de los componentes de mezcla	29
Tabla 6. Las combinaciones de punto de ajuste y las correspondientes respuestas experimentales.	31

Símbolo	Término	Unidad SI
V_s	Volumen de Partículas	m^3
V_t	Volumen total	m^3
Y	Contenido Volumétrico	1
A	Coefficiente del Efecto de Soltura entre Partículas	1
B	Coefficiente del Efecto Pared entre Partículas	1
D	Tamaño Medio de las Partículas de un Componente	μm
E	Error Residual	
X	Variable Independiente / Predictora	
Y	Variable Dependiente / de Respuesta	

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
ρ	Densidad de Empaquetamiento	1
B	Densidad de Empaquetamiento Residual	1
β_i	Coefficientes de Regresión	

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>UHPC</i>	Concreto de Ultra Alto Desempeño
<i>UHPFRC</i>	Concreto de Ultra Alto Desempeño Reforzado con Fibras
<i>VHPC</i>	Concreto de Muy Alto Desempeño
<i>HSC</i>	Concreto de Alta Resistencia
<i>SCC</i>	Concreto Auto Compactante
<i>UHSC</i>	Concreto de Ultra Alta Resistencia
<i>TP</i>	Tamaño de Partícula
<i>CEM, C</i>	Cemento
<i>SF</i>	Humo de Sílice

<i>AG</i>	Agregado
<i>FA</i>	Ceniza Volante
<i>MK</i>	Metacaolín
<i>LP</i>	Carbonato Cálcico
<i>OTR</i>	Otros Componentes
<i>SP</i>	Polvo de Sílice
<i>ARE</i>	Arena
<i>PCE</i>	Policarboxilato
<i>XF</i>	Factor Fibra
<i>TMA</i>	Tamaño Máximo de Agregado
<i>WC</i>	Relación Agua – Cemento
<i>WB</i>	Relación Agua - Material Cementante
<i>WP</i>	Relación Agua – Polvos
<i>EV</i>	Densidad de Empaquetamiento Virtual

1. INTRODUCCIÓN

Los concretos de ultra alto desempeño (UHPC) tienen propiedades sobresalientes como aumento de la resistencia a la compresión y durabilidad mejorada en comparación con los concretos convencionales. El comité ACI 239R-18 define al UHPC como:

“Concreto con una resistencia a la compresión mínima de 22.000 psi (150 MPa) y con requisitos específicos en cuanto a durabilidad, ductilidad y tenacidad; en general considera la incorporación de fibras para alcanzar estos requisitos específicos.”

Algunas de las ventajas de los UHPC son la disminución de las secciones transversales de los elementos, influyendo de esta manera en la disminución de mano de obra y equipos utilizados en la obra. Así mismo presenta algunas desventajas o inconvenientes como es su alto coste y el gran impacto ambiental que se obtiene al realizar este tipo de concreto por las altas cantidades de cemento requerido en las dosificaciones, comparado con los concretos convencionales (Abellan et al., 2018b). Se han realizado varios estudios sobre el uso de materiales cementantes suplementarios que logran suprimir estas desventajas del UHPC donde se reemplaza parcialmente el cemento por alguno de estos materiales. Entre los más estudiados se encuentran: el polvo de vidrio reciclado, ceniza volante, escoria de alto horno, carbonato cálcico, ceniza de cáscara de arroz y humo de sílice. Además, el empleo de estos materiales reduce destacadamente la huella de carbono del concreto ya que se disminuye la cantidad de material asociado al proceso de clinkerización (Abellan et al., 2018b).

Actualmente, el Ingeniero Joaquín Abellán García, estudiante de Doctorado de la Universidad Politécnica de Madrid, bajo la codirección de la Ing. Nancy Torres, se encuentra realizando su proyecto de Doctorado en la Escuela Colombiana de Ingeniería. Su proyecto está orientado en la producción de concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibras (UHPRFC) incorporando en su composición materiales cementantes suplementarios colombianos, y fibras disponibles en el mercado local. De esta forma se busca un material de mayor economía y que brinde propiedades mecánicas similares a los UHPRFC desarrollados en otros países.

El presente proyecto dirigido, donde se busca evaluar los efectos de la sustitución parcial de cemento por metacaolín en mezclas previamente optimizadas de UHPC, está enmarcado dentro de la investigación anteriormente citada.

El primer paso de la investigación consistirá en redefinir la dosificación de referencia, es decir aquella que no contiene metacaolín, planteando experimentos de tres muestras en los que se variará la relación de agua conglomerante hasta encontrar la relación que proporciona el flujo adecuado (200-260 mm). Posteriormente, a través de un diseño factorial completo de tres factores a tres niveles (alto, medio y bajo) se analizará el efecto

del metacaolín en las propiedades de flujo estático y resistencia a compresión a distintas edades del concreto. Estos factores serán la sustitución parcial de cemento por metacaolín (factor A), la relación agua conglomerante (factor B) y el contenido en superplastificante (factor C). Las propiedades analizadas serán flujo estático y resistencias a compresión a 1, 7 y 28 días. Finalmente se estudiará el efecto principal de los factores en las propiedades de UHPC.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Principal

Definir los efectos de la sustitución parcial de cemento por metacaolín en Concretos de ultra-alto desempeño.(UHPC)

2.2 Objetivos Específicos

- Definir los efectos principales del flujo estático y con la resistencia a compresión a 1, 7 y 28 días mediante gráficos del tipo *Main Effect Plot*
- Verificar los resultados arrojados por el sistema estadístico con los resultados de otras investigaciones publicadas
- Determinar la idoneidad de la sustitución parcial de cemento por metacaolín en dosificaciones con materiales locales en Colombia.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 Introducción

En esta sección se tratará sobre el progreso y la evolución del UHPC y los modelos de valoración de sus propiedades con diferentes diseños experimentales que logren describir sus características de los componentes y aplicaciones.

El concreto de ultra alto desempeño se caracteriza por presentar una microestructura densa, que exhibe tanto ultra alta resistencia a la compresión como ultra-alta durabilidad, debido al uso de componentes de tamaño nanométrico (Ghafari, Costa, Júlio, Portugal, & Duraes, 2012). El componente nanométrico más utilizado es el humo de sílice, con un tamaño medio 150 nanómetros, aunque existen otros componentes de menor tamaño pero de mayor coste como la nanosílice pirogénica cuyo tamaño medio puede alcanzar los 50 nanómetros (Ghafari, Costa, Júlio, Portugal, & Duraes, 2012)

Pese a que el objetivo de esta investigación se centra en los UHPC (sin fibras), en el estado del arte se tratarán las aplicaciones del UHPFRC (con fibras) debido a que es necesaria la inclusión de fibras para alcanzar los requisitos específicos expuesto en ACI239R y que permiten la mejora sustancial del comportamiento del material respecto al concreto convencional. Por lo tanto, se plasma y analiza el estado del arte en el cual se destaca el UHPFRC, donde se explica alguna de sus ventajas como material en refuerzos estructurales y algunos casos de estudio seleccionados de textos actuales.

3.1.1 Propiedades del UHPFRC

El UHPFRC es uno de los avances tecnológicos más actuales en el concreto. Se caracterizan por ofrecer obras estructuralmente más esbeltas, versátiles y retadoras en la arquitectura, cambiando de esta manera la visión de un material rígido y de baja capacidad de tracción, por la de un material dúctil y capaz de absorber energía por deformación mediante la adición de fibras a su matriz. Los UHPFRC brindan un comportamiento estructural más parecido al del propio acero que al concreto convencional. Se encuentran concretos analizados que presentan una resistencia a compresión superior a 150 MPa (Graybeal, 2011), y resistencias de hasta 350 MPa (Talebinejad, Asadollah Bassam, Iranmanesh, & Shekarchizadeh, 2004). Además, su densidad estructural interna reduce la permeabilidad, lo cual aumenta el ciclo de vida en la estructura, es decir aumenta la durabilidad.

Los concretos de ultra alto desempeño han llegado a crear una familia de concretos, los cuales están enfocados a diferentes características que son útiles en diferentes aplicaciones. A continuación, se observa en la Figura 1 las familias de UHPFRC.

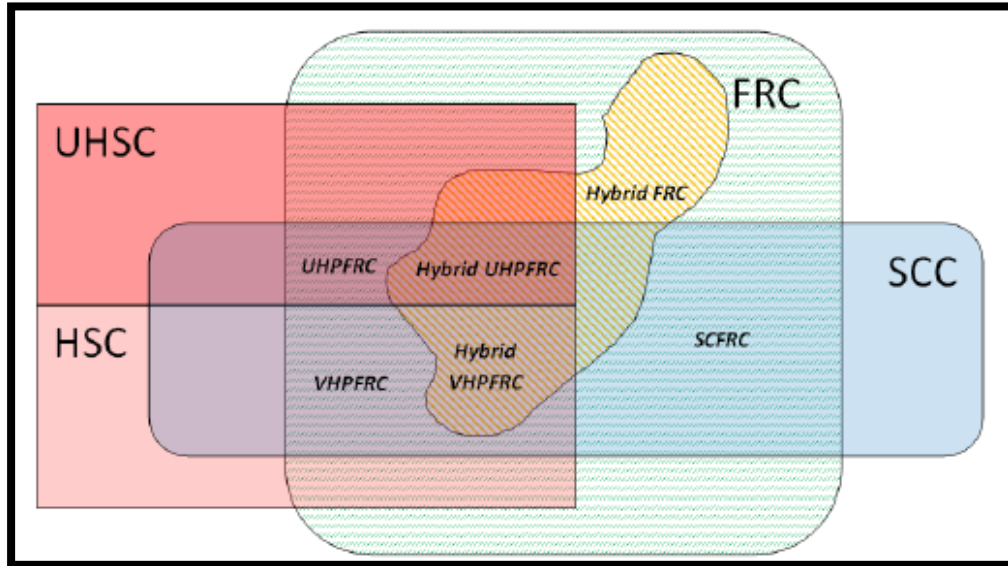


Figura 1 - Familia del UHPFRC (Serna Ros, López Martínez, & Camacho Torregosa, 2012)

Entre las diversas Familias del UHPFRC se distinguen los siguientes:

- Los concretos autocompactantes (SCC por sus siglas en inglés) permiten colocarse en zonas de difícil acceso ya que se compactan por su propio peso sin necesidad de vibración, gracias a sus características de alta fluidez y cohesividad. Estos concretos llegan al orden de 600mm de diámetro de torta o flujo plástico según NTC 5222.

Estos concretos están desarrollados en base al éter de policarboxilato, que tiene la capacidad de portar cargas negativas causadas por la desprotonación de las partículas de cemento en condiciones alcalinas. Dependiendo de las condiciones de pH que se presenten en la pasta, la concentración de iones Ca^{+2} en la superficie son las responsables de la adsorción del superplastificante por las partículas de cemento, dando lugar a una dispersión de las mismas debido a la generación de una fuerza repulsiva que impide la formación de flóculos. Esto obliga a la acomodación de las partículas involucradas, dándole la fluidez requerida a la mezcla (Arend, Wetzel, & Middendorf, 2016).

La incorporación de Concreto Reforzado con Fibras(FRC) junto con concretos autocompactantes (SCC) y de alta, muy alta y ultra-alta resistencia (HSC , VHSC y UHSC) dan como resultado a los Concretos Auto Compactante Reforzado con Fibras

SCFRC, Concreto de Muy Alto Desempeño Reforzado con Fibras (VHPFRC), Concreto de Ultra altas prestaciones (UHPC) y Concreto de Ultra Alto Desempeño Reforzado con Fibras (UHPFRC). La incorporación de estas fibras permite alcanzar ductilidad y endurecimiento por deformación a tracción directa.

3.1.2 Composición del UHPFRC

Se compara la relación de componentes en Concretos de Ultra Alto Desempeño reforzados con fibras (UHPFRC) y concretos convencionales. En la Figura 2 se muestra la dosificación típica de cada uno de los concretos nombrados.

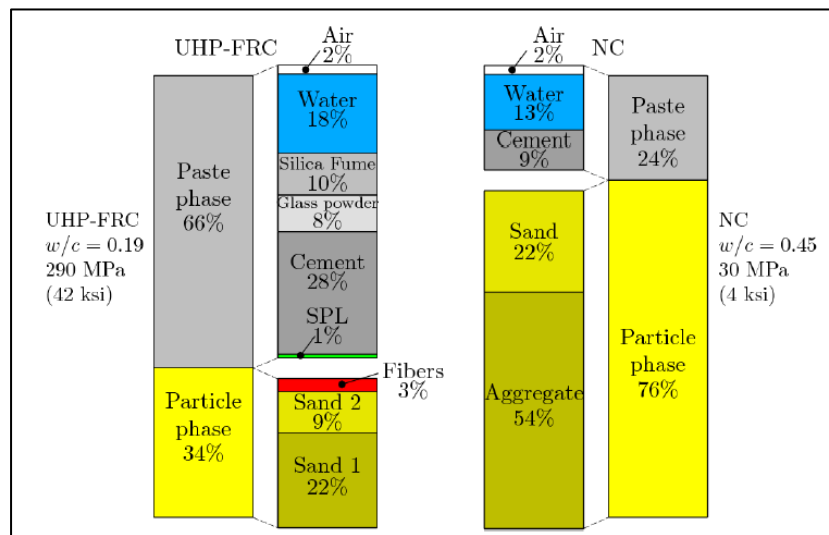


Figura 2 - Dosificación usual de una mezcla de UHPFRC comparada con concreto convencional (Naaman & Wille, 2012)

Como se puede observar en la Figura 2 la matriz cementante en el concreto convencional es mucho menor que el del UHPFRC. Esto hace observar una gran desventaja al elaborar el concreto de ultra alto desempeño debido su alto coste y su elevado impacto medio ambiental, como se había mencionado anteriormente. Para suprimir este inconveniente del UHPFRC se ha buscado sustituir parte del contenido de la matriz por otros materiales cementantes suplementarios como lo son principalmente humo de sílice, polvo de vidrio, ceniza volante, metacaolín y carbonato cálcico (Amanjean & Vidal, n.d.; Ferdosian, Camões, & Ribeiro, 2017; Vaitkevicius, Šerelis, & Hilbig, 2014). También hay casos en los que se ha incorporado escoria de alto horno y residuo de craqueo catalítico (Rodríguez, Soriano, Payá, Borrachero, & Monzó, 2012) y ceniza de cáscara de arroz (Mahmud, Bahri, Yee, & Yeap, 2016)

Sin embargo, se puede observar que, aún con el reemplazo parcial del contenido de cemento por materiales cementantes suplementarios en la matriz cementante, la dosis de éste sigue siendo mayor que en un concreto convencional. Además, se observa que la cantidad de agua requerida es mayor que en concretos convencionales, pero presentando una relación agua – cemento o agua – materiales cementantes mucho menor. Este requisito comparado a la autocompactabilidad y alta manejabilidad que requiere el UHPFRC lleva al uso de súper plastificantes de última generación basados en policarboxilato, como se mencionó en la sección anterior.

3.1.3 Densidad de Empaquetamiento y Granulometría del UHPC

El comportamiento del concreto se ve influenciado en gran medida por el tipo y grado de empaquetamiento de sus componentes. Por lo tanto, se requiere un conocimiento del concepto de empaquetamiento de las partículas y su influencia en el rendimiento de concreto; Se define la densidad de empaquetamiento virtual como la máxima densidad de empaquetamiento posible que puede tener una configuración de partículas de tamaño y cantidades determinada (De Larrard, 1999).

La figura 3 presenta un esquema de pasta densamente empacada, en la que se observa como los huecos que las partículas de cemento dejan entre sí son rellenos por partículas de menor tamaño como la ceniza volante y el humo de sílice.

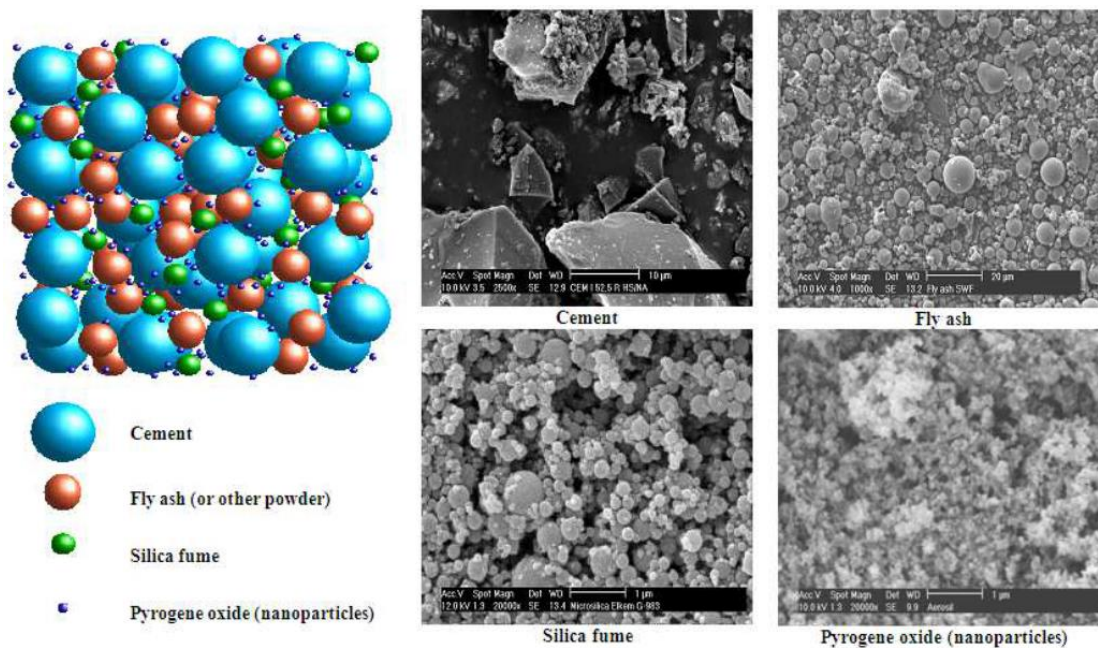


Figura 3. Esquema de empaquetamiento de partículas en una mezcla de UHPC

La Densidad de Empaquetamiento se determina como el volumen de las partículas sólidas que ocupan un volumen unitario en una mezcla granular; se puede expresar mediante la ecuación 1:

$$\gamma = \frac{V_s}{V_t} \quad (1)$$

Donde,

V_s : volumen ocupado por las partículas

V_t : Volumen total

γ : Densidad de empaquetamiento

La densidad de empaquetamiento ocupa valores entre 0 y 1, su magnitud o proporción depende del tamaño de las partículas, su forma depende del porcentaje de volumen en la mezcla, y de la forma de vibración y amasado del concreto; las densidades de empaquetamiento de mezclas de concreto convencional están por el orden de 0.60 y 0.64.

En varios artículos analizados sobre el empaquetamiento de partículas se han encontrado datos importantes que se deben dar a conocer como los siguientes:

- El empaquetamiento de las partículas de concreto tiene una influencia considerable en sus propiedades (Johansen & Andersen, 1991).
- En el contexto de la familia UHPC múltiples autores han buscado optimizar las mezclas con el fin de obtener la máxima densidad de empaquetamiento y, con ello, mejorar la durabilidad y resistencia a compresión (Fennis, 2014; Fennis, Walraven, & Den Uijl, 2013; Kwan, Chan, & Wong, 2013; Larrard, 1994).
- Se ha usado la densidad de empaquetamiento para calcular las dosis óptimas de componentes que actúan como rellenos de la matriz granular de la mezcla (Ghafari et al., 2012; *Metakaolin as an Additive in Composite Cement*, n.d.).

El desarrollo de la presente investigación se ha fundamentado en la teoría de (Larrard & Sedran, 1994) para el cálculo del empaquetamiento virtual de partículas en la cual se estudian dos efectos de interacción:

1. El efecto de soltura se presenta cuando la introducción de una o varias partículas finas en un poro formado por partículas gruesas hace que estas últimas se desplacen aumentando el volumen de los poros en la periferia de la partícula fina

pero sin hacerlos suficientemente grandes como para poder incrustar otra partícula fina (Kellough, 2008). La Figura 4 a la izquierda muestra este efecto. Para medir el efecto de soltura se usa el parámetro a_{ij} se usa los componentes i y j de la mezcla, y se utilizan para agregarlo en el cálculo del empaquetamiento virtual.

A continuación la Ecuación 2 es el resultado de una correlación realizada sobre 50 años de datos recolectados de literatura relacionada (De Larrard, 1999).

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1.02}} \quad (2)$$

el parámetro a_{ij} se calcula únicamente para todo $d_i > d_j$.

2. El efecto pared como se observa en la figura 4 a la derecha, ocurre cuando en el contorno de una partícula gruesa se forman vacíos que no son suficientemente grandes para ser llenados por partículas finas (Kellough, 2008).

El parámetro b_{ij} mide el efecto pared entre los componentes i y j de la mezcla, y se usa para incorporarlo en el cálculo del empaquetamiento virtual. La Ecuación 3 sigue la propuesta de Larrard para calcular este parámetro.

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1.50} \quad (3)$$

Sólo se debe evaluar para pares de componentes en los cuales $d_j > d_i$, debido al efecto de pared que describe la imposición de partículas gruesas sobre las finas.

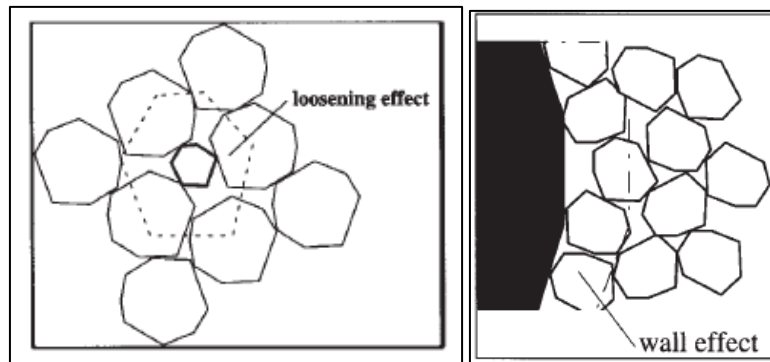


Figura 4. Efectos de Interacción entre Partículas (De Larrard, 1999)

Modelo General de Empaquetamiento Virtual

El modelo general de empaquetamiento virtual, viene dado por la ecuación 4 (De Larrard, 1999).

$$\gamma = \text{Min} \left\{ \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij} \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - \frac{a_{ij} \beta_i}{\beta_j} \right] y_j} \right\} \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

De forma análoga al caso de mezclas binarias, se puede demostrar que el componente dominante es aquel que tenga el menor empaquetamiento virtual.

3.2 Aplicaciones del UHPFRC

3.2.1 Experiencia internacional

El UHPFRC se ha utilizado alrededor del mundo sobre todo en la construcción de puentes de carretera y pasarelas peatonales, en paneles de protección y aplicaciones arquitectónicas, la primera estructura de UHPFRC del mundo se finalizó en 1997 en Canadá. Se trata de una viga triangulada de 60 m de luz sobre el río Magog, conocida como la Pasarela de Sherblooke (ver figura 5). Las diagonales de dicha viga fueron embebidas en tubos de acero para alcanzar elevadas resistencias a tracción (Henry, 2015; a partir de esta obra, la elaboración de estructuras aplicando UHPFRC fueron aumentando, así como el uso y recomendaciones de ellas (Simon, 2011) en países como EEUU, Japón, Francia, Alemania, Suiza y los Países Bajos.



Figura 5. Pasarela de sherbbooke

A continuación, se muestra imágenes de aplicaciones con UHPFRC

- En USA



Figura 6. Joppa silo para Clinker (2001 Illinois, USA)

- En Japón



Figura 7. Pasarela Sakata Mirai

- En Francia



Figura 8. Cubierta Peaje Viaducto Millau

La siguiente tabla muestra algunas de las aplicaciones de UHPFRC existentes en todo el mundo.

Estructura/Aplicación	Año de finalización	Localización	Resistencia a compresión (MPa)	Referencia
Puente peatonal Sherbrooke	1997	Sherbrooke, Canada	200	(Man-Chung Tang, 2004)
Joppa silo para Clinker	2001	Illinois, USA	220	(Abbas, Nehdi, & Saleem, 2016)
Pasarela Seynou	2002	Seúl, Corea	180	(Man-Chung Tang, 2004)
Pasarela Sakata Mirai	2002	Sakata, Japón	238	(Acker & Behloul, 2004)
Cubierta Peaje Viaducto Millau	2004	Autopista 75, Francia	165	(de Matteis et al., 2008)
Puente viario Shepherds	2005	Sidney, Australia	180	(Abbas et al., 2016)
Puente peatonal Papatoetoe	2006	Auckland, Nueva	160	(Abbas et al., 2016)

Tabla
1.ap

		Zelanda		
Cimentación torre de aerogenerador	2008	Dinamarca	210	(Abbas et al., 2016)
Plataforma del aeropuerto Haneda	2010	Tokio, Japón	210	(Walraven, 2012)
Puente Whiteman Creeck	2011	Brantford, Canada	140	(Abbas et al., 2016)
Fachada estadio Jean Bouin	2011	Paris, Francia	150-175	(Resplendino & Toutlemonde, 2011)
Puente peatonal Barranco de las Ovejas	2012	España	150	(Camacho Torregrosa, 2013a)
Rehabilitación viaducto Chillon	2015	Suiza	-	(Haber, Munoz, & Graybeal, 2017)
Puente peatonal sobre av Las Vegas (Medellin)	2017	Colombia	150	(Abellan et al., 2018b)

licaciones de UHPFRC

3.2.2 Experiencia en Colombia

Cementos Argos a través del área de Investigación y Desarrollo (I&D) viene desde hace cuatro años trabajando en la implementación de un concreto de ultra alto desempeño (UHPFRC), donde definen que "es un concreto de última tecnología que tiene materiales muy especiales en su interior y que busca en esencia parecerse lo máximo posible al acero, o reducir en gran medida las cuantías del mismo en todo tipo de estructuras, comparado con un concreto convencional." (www.360encocreto.com)

El puente peatonal que conecta el campus de la Universidad EAFIT en Medellín con su edificio de Idiomas es la primera obra de infraestructura en Colombia y Latinoamérica en la que se utilizó UHPFRC, al principio el diseño de la obra contemplaba una estructura metálica, pero Argos le propuso a la Universidad cambiar el acero por Concreto Avanzado justificando así que la obra llegaría a un ahorro del 33% en el costo total de la obra. Esta obra se muestra en las figuras 9 y 10. Las características del UHPFRC empleado en esta obra se muestran en la Tabla 2.

Guillermo Valencia, estuvo a cargo del diseño arquitectónico y el diseño estructural a cargo de Juan Carlos Restrepo. Fue construido por Coninsa Ramón H. Argos fue el proveedor del concreto y Titán Manufacturas de Cemento realizó los elementos prefabricados.

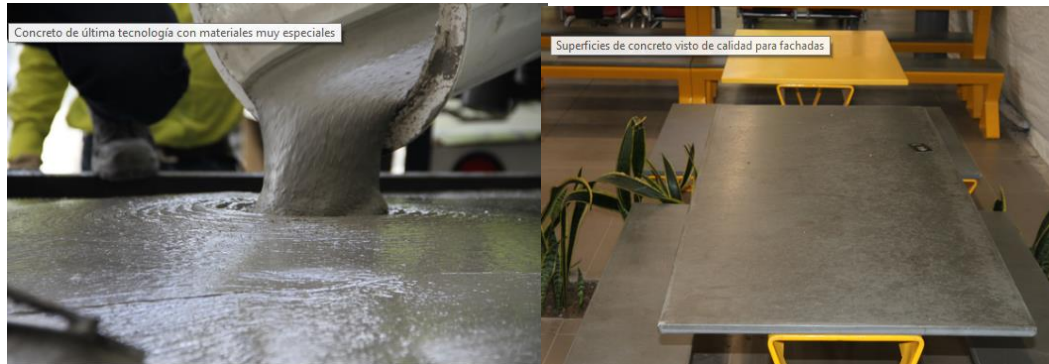


Figura 9. Implementación de UHFRC (ARGOS)

Características del puente peatonal:

longitud (m)	110
peso (t)	300
luz principal(m)	43
apoyos	4 columnas
	1 viga cabezal
piezas en concreto avanzado(10t C/U)	29
Resistencia a compresion a28 días(MPA)	170

Tabla 2. Características puente peatonal localizada en la avenida Las Vegas (Medellín)



Figura 10. Puente Peatonal en Medellín, Colombia 2017 (360ARGOS)

3.3 Principales desafíos para la implementación del UHPFRC

Al surgir el material UHPFRC en la construcción, ha producido varios cambios en las formas estructurales generando gran desarrollo en campos de aplicación y diseño como se verá a continuación. Sin embargo, su elevado costo sigue siendo la barrera principal en el mercado

El trabajo realizado por (Park, Kim, Ryu, & Koh, 2012) habla de cómo las fibras metálicas son el componente que más sobre pondera el costo total del UHPFRC. De esta manera investigaron cómo crear materiales UHPFRC con las características mecánicas deseadas como la resistencia a la rotura y la capacidad de deformación en probetas sometidas a tracción, empleando mezclas híbridas de micro y macro fibra. Esta combinación de fibras permitiría reducir el volumen total de fibra lo que ayudaría a la reducción del coste total.

Otro factor que influye es la salud ambiental que se brinda al entorno. Varios estudios han demostrado que al elaborar el cemento portland tradicional, el proceso de clinkerización genera grandes emisiones de CO₂ a la atmósfera. La producción anual

estimada de 1,5 mil millones de toneladas de cemento Portland es responsable de casi el 7% de las emisiones globales de CO₂ (Nguyen Van Tuan, Ye, Breugel, Fraaij, y Danh 2011). Por lo tanto, uno de los objetivos principales al elaborar mezclas UHPC/UHPFRC es producir concreto con menos cemento, asegurando una buena resistencia y durabilidad de las estructuras.

Varios investigadores se han concentrado en el efecto ambiental, estudiando de esta manera la realización de un UHPC/UHPFRC ecológico y económico. Algunos estudios relacionados con la sustitución parcial de cemento por materiales cementantes suplementarios se muestran a continuación:

- ✚ (Li et al., 2016) utilizaron carbonato cálcico pulverizado en UHPC con el fin de mejorar el proceso de hidratación en la edad temprana, y las propiedades mecánicas.
- ✚ (Huang, Z., y Cao, 2012) emplearon nano-CaCO₃ logrando un aumento del 17% en la resistencia a la compresión en comparación con las muestras de control UHPFRC.
- ✚ (Vaitkevicius et al., 2014) utilizaron polvo de vidrio. Esto aumentó la velocidad de disolución de cemento Portland sometido a un tratamiento térmico, por lo que se aceleró el proceso de hidratación. Como consecuencia se consiguió reducir el coste del UHPC y mejorando sus atributos ambientales
- ✚ (NA Soliman y Tagnit-Hamou, 2017) emplearon polvo de vidrio fino (FGP) como sustitutivo del humo de sílice en UHPFRC. Se lograron obtener valores de resistencia a la compresión de 235 y 220 MPa con 2 días de curado al vapor, respectivamente, con una sustitución de 30% y 50% de SF con polvo de vidrio fino con un tamaño medio de partícula (d₅₀) de 3,8 μm. Sin embargo, la cantidad de cemento utilizada excede 800 kg / m³.

Hay muchas más investigaciones con otros materiales como ceniza volante, escoria granulada, polvo de vidrio, ceniza de cascara de arroz, etc. Todos con el fin de reducir costos y aportar sostenibilidad. Estas investigaciones demuestran que, con la debida investigación de los materiales locales disponibles, y teniendo en cuenta las necesidades de la estructura/aplicación, los UHPFRC pueden constituir una alternativa durable, resistente y sostenible en el desarrollo de infraestructuras en América Latina.

4. METODOLOGÍA

4.1 Diseño de experimentos

Con la finalidad de comprender el efecto de la sustitución parcial de cemento por metacaolín en una mezcla de concreto de ultra alto desempeño sin fibras (UHPC), se ha planteado un diseño de experimentos (DoE). El objetivo de este diseño es optimizar un proceso experimental que permita obtener conclusiones con un número reducido de ensayos. Con este diseño de experimentos realizados, se analiza el efecto de los factores en las variables respuesta. Para resumir, las ventajas de utilizar un método de diseño de experimentos incluyen:

- ✚ Construcción de un modelo de regresión polinómica con los parámetros relevantes para estimar la respuesta correspondiente.
- ✚ Reducción en la cantidad de experimentos.
- ✚ La evaluación de los factores y la interacción entre estos.

Un diseño compuesto central (CCD) es un DoE eficiente, utilizado para construir un modelo polinómico de segundo orden para cada respuesta. El CCD tiene varias ventajas, como:

- ✓ Estimar el efecto de segundo orden de cada uno de los factores para cada respuesta, con un número relativamente pequeño de corridas experimentales y determinando las interrelaciones entre los factores (Abellan et al, 2018a; Ghafari, Costa, & Julio, 2015; Ghafari et al, 2014).
- ✓ Es un modelo de aproximación muy flexible como a la respuesta verdadera; se puede tomar en una amplia variedad de formas funcionales (lineales, cuadráticas, etc.).
- ✓ Fácil de estimar los coeficientes en el polinomio de la ecuación (5).

¿EN QUÉ CONSISTE UN CCD?

Un CCD consiste en un diseño factorial completo o fraccionado que cuenta con puntos centrales y se aumentan con puntas de estrella. La estructura de CCD empleado en la presente investigación requiere $2^k + c$ puntos de diseño, donde k es el número de variables estudiadas, siendo 2^k , los puntos factoriales representan todas las combinaciones de valores codificados $x = \pm 1$, que están en las esquinas de cubo, y el centro c señala con todos los niveles establecidos a nivel codificado 0, que están en el centro del cubo. Un gráfico de un diseño CCD tridimensional para $k = 3$ variables

independientes como el del presente proyecto se muestran en la Fig. 11. Un diseño con 3 factores, 2 puntos centrales, y 8 puntos factoriales con un total de 10 puntos de ajuste, se utilizó para continuar el estudio de la variable metacaolín en esta investigación.

Las variables de los experimentos se codificaron de acuerdo con la Ec. (5):

$$X_j = \frac{(Z_j - Z_{0j})}{\Delta_j} \quad (5)$$

Donde:

X_j : valor codificado de la variable independiente

Z_j : valor real de la variable independiente

Z_{0j} : valor real de la variable independiente en el punto central

Δ_j : valor de cambio de paso.

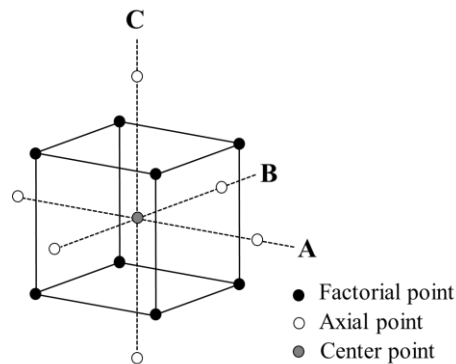


Figura 11. Diseño compuesto central durante 3 factores (A, B y C) en 2 niveles Fuente: (Abellan et al., 2018a).

El CCD se utilizó para estimar la variable respuesta (en nuestro caso el flujo estático o la resistencia a compresión) según la Eq. (6) en forma de una ecuación polinómica de segundo grado:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j \quad (6)$$

Y: variable de respuesta predicha (flujo estático, resistencia a compresión a 1, 7 o 28 días)

β_0 : intercepción

β_i : coeficientes lineales

Beta II: coeficientes cuadráticos

β_{ij} : coeficientes de la interacción

x_i, x_j : variables o factores independientes elegidos.

En este estudio también se utilizaron otras técnicas estadísticas, compatibles con CCD, como el gráfico de efectos principales. Un gráfico de efectos principales presenta el efecto de una de las variables independientes, también conocida como Factor, en la respuesta, ignorando los efectos de todas las demás variables independientes.

R, un lenguaje y entorno de computación estadística (R Core Team, 2018), Diseño y análisis de experimentos, se utilizó para planificar el DoE y analizar sus resultados.

Es así como a través del estado del arte consultado y al trabajo analítico realizado en el estudio Doctoral del Ing. Abellán, se plantea la pertinencia del presente estudio en apoyo a la validación experimental de concretos UHPC adicionados con metacaolín y su efecto en el flujo estático y la resistencia a la compresión a edades de 1, 7 y 28 días.

5. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

La Figura 12 muestra diferentes fases del desarrollo de la investigación experimental.



Figura 12.Experiencia práctica

Se utilizan tres factores independientes en la mezcla, estos son: sustitución del cemento Portland, la relación agua conglomerante y la cantidad de superplastificante. Estos factores fueron incluidos en un estudio por diseño compuesto central compuesto (CCD). A continuación, se muestra en la ecuación 7, la representación del factor A, donde se representa la sustitución parcial del cemento por MK.

$$Factor A (\%) = \frac{MK}{OPC + MK} \quad (7)$$

Donde las cantidades de OPC y MK se expresan en Kg / m³.

Se realizaron 10 diseños de mezclas, acorde al diseño de experimentos y considerando las tres variables independientes (Factor A, Factor B, Factor C).

5.1 Materiales

Durante el proceso de investigación se usaron los siguientes componentes:

1. Cemento Portland tipo III (OPC)



Figura 13. Cemento tipo III. Fuente: Ingeniero Joaquín Abellán

2. Humo de sílice (SF) es un material puzolánico de alta reactividad, subproducto del desecho de la fabricación de silicio metálico y aleaciones de ferrosilicio. Su proceso es resultado de la reducción de cuarzo de pureza elevada (SiO_2) con carbón en hornos de arco eléctrico, a temperaturas mayores a $2000\text{ }^\circ\text{C}$. Debido a su finura (<http://www.imcyc.com/>)



Figura 14. Humo de sílice. Fuente: Ingeniero Joaquín Abellán

3. Metacaolín (MK) es un material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas aproximadas a $550\text{ }^\circ\text{C}$, produciéndose una transformación de su estructura cristalina. (<http://teoriadeconstruccion.net/>)



Figura 15. Metacaolín. Fuente: Ingeniero Joaquín Abellán

4. Micro carbonato (UF) es la principal fuente de calcio en esmaltes y también fundible a alta temperatura. Otorga dureza y durabilidad, y en grandes cantidades

produce un esmalte mate, puede mejorar el acabado de los objetos (<http://ceramicdictionary.com/>)



Figura 16. Micro carbonato. Fuente: Ingeniero Joaquín Abellan

5. Harina de vidrio reciclado (GP28), con un tamaño medio de partícula (d_{50}) de 28 micrones, se obtiene a partir de vidrio reciclado cuidadosamente seleccionado a partir de un proceso de molturación del vidrio



Figura 17. Harina de vidrio reciclado. Fuente: Ingeniero Joaquín Abellan

6. Arena sílicea (SS) con un tamaño máximo de partícula de 600 micrones y un tamaño medio de 165 micrones, esta arena sílicea procede de la minería de Sibaté (Cundinamarca).



Figura 18. Arena silicea. Fuente: Ingeniero Joaquín Abellan

7. El agua utilizada para la mezcla y curado fuera agua ordinaria del grifo y superplastificante a base de éter de policarboxilato (HRWR).

A continuación, se muestra en la Tabla 3 las propiedades químicas y la densidad de los materiales empleados en la presente investigación.

Análisis químico	OPC	SF	MK	UF	GP28	SS
SiO ₂ %	19.42	92.29	52.17	0.90	72.89	95.80
Al ₂ O ₃ %	4.00	0.59	39.11	0.10	1.67	0.11
CaO%	64.42	3.89	0.78	55.51	9.73	0.38
MgO%	1.52	0.26	0.07	0.70	2.08	0.20
SO ₃ %	1.93	0.07	0.22	0.10	0.01	0.52
Na ₂ O%	0.19	0.31	0.61	0.03	12.54	0.25
K ₂ O%	0.39	0.54	0.06	0.00	0.76	3.49
TiO ₂ %	0.38	0.01	1.48	0.00	0.04	0.25
Mn ₃ O ₄ %	0.05	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
Fe ₂ O ₃ %	3.61	0.24	2.69	0.05	0.81	0.09
Pérdida por ignición (LOI)%	2.58	8.06	4.22	42.21	1.00	0.31
densidad específica ($\frac{gr}{cm^3}$)	3.16	2.20	2.76	2.73	2.55	2.65

Tabla 3. Propiedades físico-químicas de los materiales.

La figura 19 presenta la distribución de tamaño de partículas de todos los componentes contemplados en la presente investigación. Así mismo, se presenta también en azul la curva de Andreasen y Andersen modificada que sirve como ajuste para el empaquetamiento de la dosificación de referencia sin metacaolín.

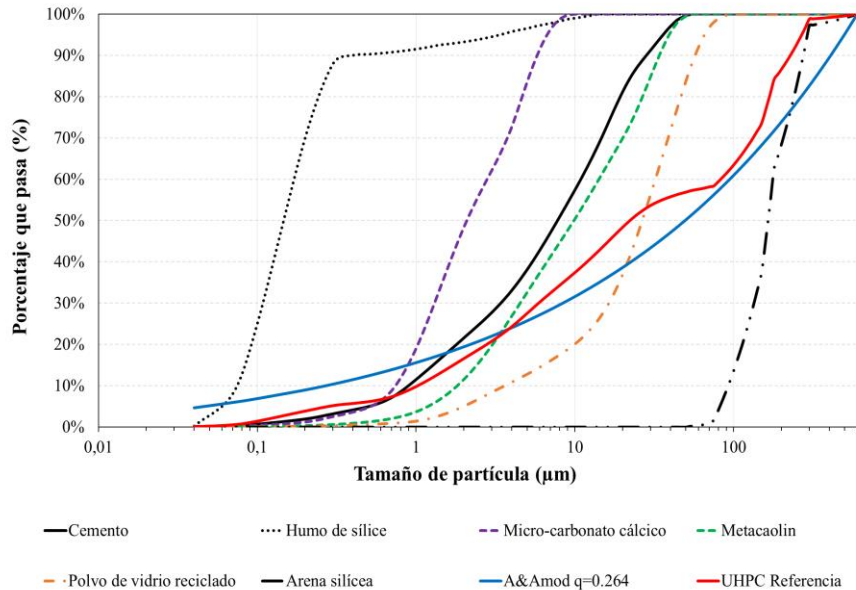


Figura 19. Tamaño de Partícula de los materiales utilizados.

5.2 Diseño de mezcla

5.2.1 Mezcla de referencia sin MK

La dosificación utilizada como referencia en este estudio fue una mezcla donde no se tendrá en cuenta el MK, previamente optimizada con baja cantidad de cemento (620 kg / m³), un contenido máximo de humo de sílice de 100 kg/m³, y el uso de harina de vidrio reciclado de 308,98 Kg/m³. Para asegurar una matriz cementante densamente compacta, la mezcla de referencia se calculó usando el modelo de empaquetamiento de las partículas Andreasen y Andersen modificado (A & A_{mod})(Funk & Dinger, 1994) con valor q de 0,264 (Abellan et al., 2018a), De acuerdo con la Ec. (8). La dosis de referencia sin FCC y con la máxima cantidad de cemento aparece como Run-12 en la Tabla 4.

$$P(D) = \frac{(D^q - D_{min}^q)}{(D_{max}^q - D_{min}^q)} \quad (8)$$

Donde D es el tamaño de partícula, P (D) es la fracción en peso de sólidos totales que son más pequeños que D, D_{max} y D_{min} son los tamaños máximo y mínimo de partículas,

respectivamente, y q es el exponente Fuller. El valor de q fue determinado en investigaciones anteriores (Abellan et al., 2018a).

5.2.2 Mezclas con MK

La inclusión de MK implica que probablemente se presente una disminución en la trabajabilidad de las mezclas debido a su contenido de aluminosilicatos (ver Tabla 3). Por lo tanto, se utilizaron tres factores independientes en la mezcla, estos son: sustitución del cemento Portland, la relación agua conglomerante y la cantidad de superplastificante. Estos factores fueron incluidos en un estudio por diseño compuesto central compuesto (CCD). A continuación, se muestra en la ecuación 9, la representación del factor A, donde se representa la sustitución parcial del cemento por MK.

$$Factor A (\%) = \frac{MK}{OPC + MK} \quad (9)$$

Donde las cantidades de OPC y MK se expresan en kg / m^3 .

Se realizaron 10 dosificaciones de diseños de mezclas, acorde al diseño de experimentos y considerando las tres variables independientes (Factor A, Factor B, Factor C). El contenido en MK varió desde los 0 kg/m^3 hasta los 91.57 kg/m^3 (medido con la variación del factor A), Factor B (relación agua *binder*) es variado desde 0,164 hasta 0,181, y el Factor C (contenido en volumen del superplastificante) se varía desde 1,642% hasta 2,358%, como se muestra en la tabla 4. Los contenidos de OPC y MK vienen expresados en kg/m^3 , la relación agua *binder* en ratio y el HRWR en relación de volumen sobre el volumen total de la mezcla. El término *binder* abarca la suma de cemento y materiales cementantes suplementarios.

En la tabla 5 se muestra la dosificación en kg por m^3 que se utilizó para las 10 dosificaciones adicionales y la dosificación de referencia (sin MK)

Factor A					
Codificado	-1.8	-1.0	0.0	1.0	1.8
Cemento	488.5	528.4	554.2	602.0	620.0
Metacaolin	131.5	91.6	65.8	18.0	0.0
Factor B					
Codificado	-1.8	-1.0	0.0	1.0	1.8
w/b	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Factor C					
Codificado	-1.79	-1.00	0.00	1.00	1.79
pce	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Tabla 4. Factores y rango de variación.

Cantidades para kg/ m3								
mezcla	Cemento	SF	GP28	UF	MK	Agua	HRWR	Arena
1	528.4	100.0	310.0	257.1	91.6	202.1	19.3	790.8
2	602.0	100.0	310.0	257.1	18.0	202.1	19.3	802.2
3	528.4	100.0	310.0	257.1	91.6	214.9	19.3	756.7
4	602.0	100.0	310.0	257.1	18.0	214.9	19.3	768.1
5	528.4	100.0	310.0	257.1	91.6	199.0	23.6	788.1
6	602.0	100.0	310.0	257.1	18.0	199.0	23.6	799.6
7	528.4	100.0	310.0	257.1	91.6	211.9	23.6	754.0
8	602.0	100.0	310.0	257.1	18.0	211.9	23.6	765.5
9	554.2	100.0	310.0	257.1	65.8	207.0	21.5	776.4
10	554.2	100.0	310.0	257.1	65.8	207.0	21.5	776.4
Referencia	620.0	100.0	310.0	257.1	0.0	207.0	21.5	786.7

Tabla 5. Proporción de los componentes de mezcla

5.3 Normas y procedimientos usados en la práctica

Para la preparación de la mezcla, se utilizó un mezclador de mortero de 4 litros. Luego las mezclas se llevan inmediatamente en su estado fresco a determinar el diámetro de flujo estático de acuerdo con la norma ASTM 1437. El asentamiento es medido con un molde cónico truncado relleno con la mezcla fresca. Éste es colocado encima de una placa lisa y se levanta hacia arriba (ver Figura 20 a). Finalmente, el diámetro es tomado en cuatro direcciones perpendiculares, tomando el promedio de los diámetros con la siguiente ecuación 10.

$$\emptyset_m = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \emptyset_i \quad (10)$$

Luego de realizar la mezcla y medir el diámetro, se vierte y se vacía la mezcla en moldes cúbicos de 50 mm de lado (ver Figura 20 b). A las 24 horas de realizar el vertido se retira el molde y se procede al curado de los especímenes en un cuarto con humedad a 20 °C

hasta el día de la prueba a compresión. Para determinar la resistencia a la compresión se hace uso de una máquina de compresión con 1.000 KN de capacidad , siguiendo la norma ASTM C109 (ASTM, 2010). Se ensayaron tres muestras para cada edad (1 día,7 días,28 días).

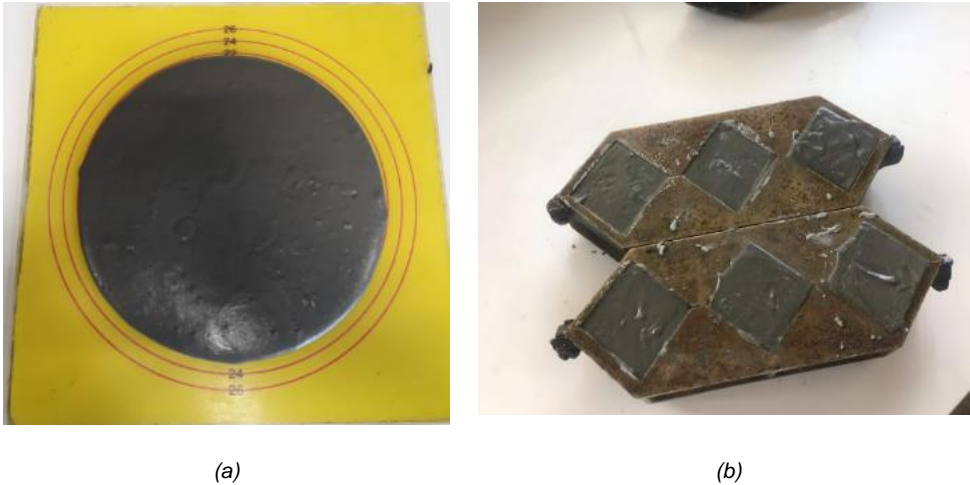


Figura 20. Dispersión de la tabla de flujo (a) y cubos de 50 mm y sus moldes utilizados en esta investigación (b)

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

6.1 Resultados experimentales

Los resultados experimentales se presentan en la Tabla 6., donde:

F - Flujo estático en milímetros (mm)

F1 - Resistencia a la compresión a las 24 horas en mega pascales (MPa)

F7 - Resistencia a la compresión a los 7 días en mega pascales (MPa)

F28 - Resistencia a la compresión a los 28 días en mega pascales (MPa)

Ref.- Referencia. UHPC sin metacaolín

correr	A	B	C	F1	F7	F28	F
1	-1	-1	-1	58.0	97.9	139.5	100.0
2	1	-1	-1	43.8	94.0	139.4	126.3
3	-1	1	-1	57.9	97.3	129.1	102.5
4	1	1	-1	29.3	93.8	130.4	178.8
5	-1	-1	1	57.8	97.6	140.8	133.8
6	1	-1	1	22.8	92.6	140.7	218.8
7	-1	1	1	57.7	97.5	139.3	172.5
8	1	1	1	28.5	91.4	139.3	243.8
9	0	0	0	51.8	96.1	149.6	132.5
10	0	0	0	50.1	100.1	150.0	137.5
Ref	-1.7	0	0	41.0	97.2	141.6	226.3

Tabla 6. Las combinaciones de punto de ajuste y las correspondientes respuestas experimentales.

Como se mostró en las 10 dosificaciones que es posible llegar a resistencia a la compresión a 28 días superior a 150 MPa cuando la sustitución de aproximadamente un 10.4% del peso de cemento por MK respectivamente. Sin embargo, aquellos valores de sustitución parcial, en las condiciones de W / B y HRWR, implicaban una disminución total de la trabajabilidad.

6.2 Gráfico de efecto principal de los factores

Para centrarse en la sustitución parcial de OPC por MK, en la Figura 22 se presenta un gráfico de efecto principal de los factores para cada respuesta y los resultados se discuten a continuación.

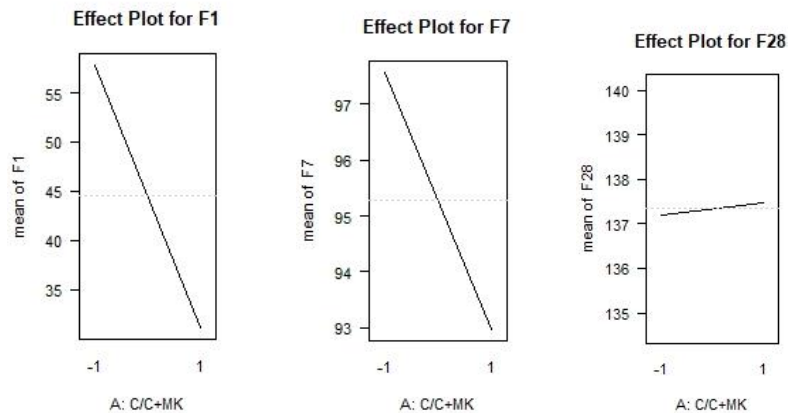


Figura 21. Efecto del Factor A en 1, 7 y 28 días resistencia a la compresión

Se muestra que la cantidad de MK afecta positivamente la resistencia a la compresión a los días 1 y 7. A mayor contenido en metacaolín (menor valor del factor A) mayor resistencia a 1 y 7 días.

Se puede concluir que la presencia de aluminosilicatos en el MK (39%, según la tabla 3) provoca una aceleración en el proceso de hidratación tempranas produciendo una mayor cantidad de gel tobermorita (CSH) que en la muestra sin MK.

La adición de MK a los cementos para la producción de concreto, producen cambios de fase y transformaciones microestructurales que inciden en las propiedades físicas y químicas del material. Los iones OH⁻ que se producen en la hidratación del cemento, se depositan en los poros del concreto y al entrar en contacto con la Sílice amorfa de las puzolanas, como es el caso del MK, se forma un gel extra de silicato de calcio hidratado y se reduce el hidróxido de calcio, otorgándole ventajas importantes a las mezclas, tales como el aumento de sus resistencias mecánicas (<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/844>).

Por el contrario, la adición de MK a los 28 días no genera un cambio significativo en la resistencia a la compresión

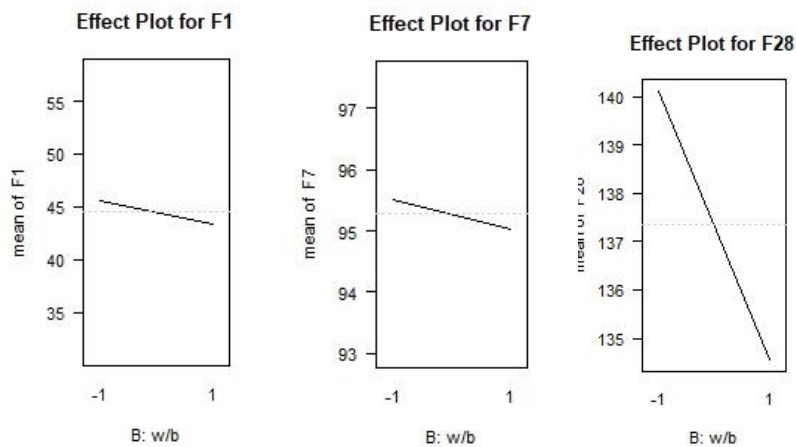


Figura 22. Efecto del Factor B: en 1, 7 y 28 días resistencia a la compresión

De acuerdo con la figura 23, Muestra que el Factor B tiene un efecto de disminución en la resistencia a la compresión en todas las edades, los valores disminuyen a medida que disminuye la relación agua *binder*.

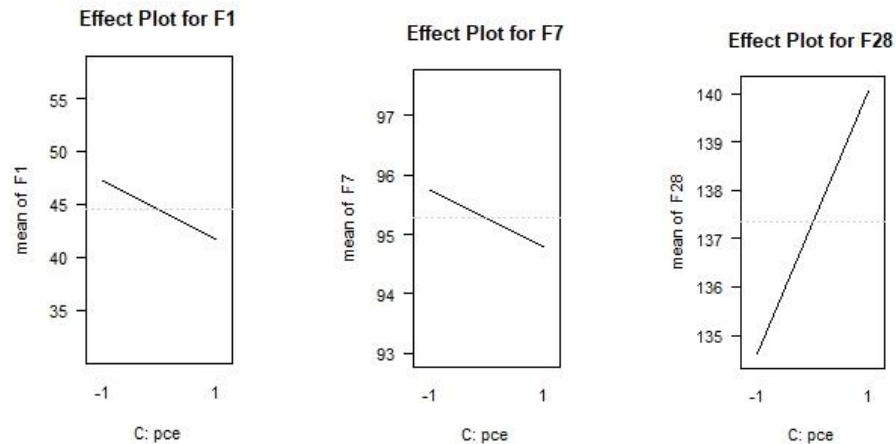


Figura 23. Efecto del Factor C: en 1, 7 y 28 días resistencia a la compresión

Se puede observar en la figura 24 que el policarboxilato retrasa el proceso de hidratación a edades tempranas, provocando un retraso en el desarrollo de resistencias. Al pasar este efecto, y debido principalmente a que permite una relación agua *binder* baja, provoca un aumento de las resistencias a los 28 días.

El super plastificante fue causante de mejorar la trabajabilidad de la mezcla con el fin de lograr una mezcla altamente fluida manteniendo las propiedades mecánicas y la disminución de la relación agua/*binder* para mejorar la resistencia a compresión y la durabilidad, conservando su fluidez.

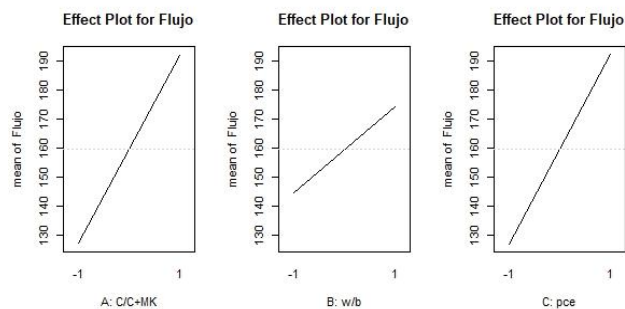


Figura 24. Flujo estático

De acuerdo con la EFNARC (EFRNARC, 2005), Un valor de flujo estático de 240 a 260 mm se considera adecuado para una mezcla autocompactante. Según la Figura 24, la adición de MK condujo a una caída notable en los valores de flujo estático. Por otra parte, varios estudios han demostrado que la inclusión de MK en un concreto requiere más agua o más plastificante para llegar a una determinada trabajabilidad (Arizzi y Cultrone, 2018; Torres Castellanos, 2014). Sin embargo, es importante destacar que a mayor sea la relación agua cemento se tendrá una mayor fluidez pero una menor resistencia.

7. CONCLUSIONES

En este proyecto se analizó el efecto de la sustitución parcial de cemento por MK mediante un diseño compuesto central de tres factores (CCD). Sobre la base de los resultados obtenidos de este análisis, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- a) Se pueden lograr resistencias superiores a los 150 MPa en compresión, cuando se reemplaza un 10.4% de cemento por MK, para una determinada condición de relación agua binder (w/b) y super plastificante (PCE).
- b) La adición de MK condujo a una caída notable en los valores de flujo estático con respecto a la muestra de la mezcla de referencia.
- c) La inclusión de MK afecta altamente la resistencia a la compresión de 1 día. Los valores de resistencia temprana aumentan a medida que la sustitución parcial de OPC aumenta.
- d) Para edades de 28 días, la inclusión de MK no tiene un efecto significativo en la resistencia a la compresión.
- e) El contenido de superplastificante tiene un efecto positivo en el flujo estático. Con respecto a la resistencia a la compresión, el contenido de policarboxilato tiene un efecto negativo para la resistencia temprana pero un efecto positivo en la resistencia a la compresión de 28 días.
- f) Se encontró que el uso de materiales disponibles localmente, como el MK, es una opción adecuada para producir UHPC con un bajo contenido en cemento. El reemplazo parcial de cemento con este material cementante suplementario puede tener una gran influencia en el ahorro de energía y en la reducción de la emisión de CO₂ en la fabricación de cemento.

8. REFERENCIAS

- Abbas, S., Nehdi, M. L., & Saleem, M. A. (2016). "Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges." *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(3), 271–295. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0157-4>
- Abdulkareem, O. M., Ben Fraj, A., Bouasker, M., & Khelidj, A. (2018). "Effect of chemical and thermal activation on the microstructural and mechanical properties of more sustainable UHPC." *Construction and Building Materials*, 169, 567–577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.214>

- Abellan, J., Torres, N., Núñez, A., & Fernández, J. (2018a). "Influencia del exponente de Fuller, la relación agua conglomerante y el contenido en policarboxilato en concretos de muy altas prestaciones." *IV Congreso Internacional de Ingeniería Civil*. Havana, Cuba.
- Abellan, J., Torres, N., Núñez, A., & Fernández, J. (2018b). "Ultra high performance fiber reinforced concrete: state of the art, applications and possibilities into the latin american market." *XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*. Lima, Peru.
- Amanjean, E. N., & Vidal, T. (n.d.). *Low cost Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with flash metakaolin*.
- Arend, J., Wetzel, A., & Middendorf, B. (2016). Investigation of Superplasticiser-Particle-Interacton via Fluorescence Microscopy. *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete2*, 34–35.
- Arizzi, A., & Cultrone, G. (2018). Comparing the pozzolanic activity of aerial lime mortars made with metakaolin and fluid catalytic cracking catalyst residue : A petrographic and physical-mechanical study. *Construction and Building Materials*, 184, 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.002>
- ASTM. (2010). "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens)." *American Society for Testing and Materials C-109/C109M*, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1520/C0109>
- Camacho Torregrosa, E. (2013a). *Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties*.
- Camacho Torregrosa, E. (2013b). "Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties." Polytechnic University of Valencia, Spain.
- Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., WikstrÄom, C., & Wold, S. (2000). "Design of Experiments: Principles and Applications" (Learnways AB, Ed.). Umea.
- Fennis, S., Walraven, J. C., & Den Uijl, J. A. (2013). Compaction-interaction packing model: Regarding the effect of fillers in concrete mixture design. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 46(3), 463–478. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9910-6>
- Ferdosian, I., Camões, A., & Ribeiro, M. (2017). "High-volume fly ash paste for developing ultra-high performance concrete (UHPC)." *Ciencia e Tecnologia Dos Materiais*, 29(1), e157–e161. <https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2016.10.001>
- Funk, J. E., & Dinger, D. (1994). "Predictive process control of crowded particulate suspensions: Applied to ceramic manufacturing" (Springer Sci. and Bus. Media., Ed.).

- Ghafari, E., Costa, H., & Júlio, E. (2015). "Statistical mixture design approach for eco-efficient UHPC." *CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES*, 55(September), 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.016>
- Ghafari, E., Costa, H., Júlio, E., Portugal, A., & Duraes, L. (2012). Optimization of UHPC by Adding Nanomaterials. *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete2*, 71–78. Kassel.
- Ghafari, E., Costa, H., Nuno, E., & Santos, B. (2014). "RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers." *Construction and Building Materials*, 66(September), 375–383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.064>
- Graybeal, B. (2011). Ultra-High Performance Concrete. *Federal Highway Administration Journal*, 1(38), 1–8.
- Johansen, V., & Andersen, P. J. (1991). Particle Packing and Concrete Properties. *Materials Science of Concrete II*, 111–148.
- Kellough, C. (2008). *Simple Explanation of the Compressible Packing Model*. 1–4.
- Kwan, A. K. H., Chan, K. W., & Wong, V. (2013). A 3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect. *Powder Technology*, 237, 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.043>
- Larrard, F. (1994). Optimization of Ultra-High Performance Concrete by the Use of a Packing Model. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 997–1009.
- Lenth, R. V. (2012). "Response-surface methods in R, using rsm." *Journal of Statistical Software*, 32(7), 1–17. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18637/jss.v032.i07>
- Li, W., Asce, M., Huang, Z., Zu, T., Shi, C., Duan, W. H., ... Asce, M. (2016). "Influence of Nanolimestone on the Hydration , Mechanical Strength , and Autogenous Shrinkage of Ultrahigh-Performance Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001327](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001327).
- Mahmud, H. B., Bahri, S., Yee, Y. W., & Yeap, Y. T. (2016). Effect of Rice Husk Ash on Strength and Durability of High Strength High Performance Concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2016(3), 390–395.
- Metakaolin as an Additive in Composite Cement*. (n.d.).
- Montgomery, D. C. (2005). *Design and analysis of experiments*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Mosaberpanah, M. A., & Eren, O. (2017a). "Effect of quartz powder, quartz sand and water curing regimes on mechanical properties of UHPC using response surface modeling." *Advances in Concrete Construction*, 5(5), 481–492.

<https://doi.org/10.12989/acc.2017.5.5.481>

- Mosaberpanah, M. A., & Eren, O. (2017b). "Statistical models for mechanical properties of UHPC using response surface methodology." *Computers and Concrete*, 19(6), 667–675. <https://doi.org/10.12989/cac.2017.19.6.667>
- Naaman, A., & Wille, K. (2012). The Path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete: Five Decades of Progress. *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 22–34.
- Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., & Koh, K. T. (2012). Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.009>
- Puertas, F., Santos, H., Palacios, M., & Martínez-Ramírez, S. (2005). "Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes." *Advances in Cement Research*, 17(2), 77–89. <https://doi.org/10.1680/adcr.17.2.77.65044>
- R Core Team. (2018). "*R: A Language and Environment for Statistical Computing*" (R. F. for S. Computing, Ed.). Vienna, Austria.
- Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). "Composition of reactive powder concretes." *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501–1511. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
- Shaaban, M., & Ahmed, S. (2016a). "Development of Ultra-High Performance Concrete Jointed Precast Decks and Concrete Piles in Integral Abutment Bridges." *The First International Symposium on Jointless & Sustainable Bridges*, (May). Fuzhou, Fujian, China.
- Shaaban, M., & Ahmed, S. (2016b). "Mechanical Behaviour of Ultra-High Performance Concrete Obtained with Different Concrete Constituents and Mix Designs." *Resilient Infrastructure*, (June), 702-1;702-10. London, UK.
- Soliman, N. A., & Tagnit-Hamou, A. (2017). "Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap." *Construction and Building Materials*, 139, 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.084>
- Soliman, Nancy A., & Tagnit-Hamou, A. (2017). "Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC." *Construction and Building Materials*, 145, 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.187>
- Tagnit-Hamou, A., Soliman, N. A., & Omran, A. (2016). "Green Ultra - High - Performance Glass Concrete." 3(1), 1–10.
- Talebinejad, I., Asadollah Bassam, S., Iranmanesh, A., & Shekarchizadeh, M. (2004). Optimizing mix proportions of Normal Weight Reactive Powder Concrete with

Strengths of 200-350 MPa. *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 133–141. Kassel.