

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA DE CONCRETO EN
PRESENCIA DE ESCORIA Y NANO-SÍLICE OPTIMIZADA POR RESISTENCIA
A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

**CRISTIAN CAMILO MORENO SEPÚLVEDA
SERGIO ALBERTO MORA ALBARRACÍN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA DE CONCRETO EN
PRESENCIA DE ESCORIA Y NANO-SÍLICE OPTIMIZADA POR RESISTENCIA
A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

**CRISTIAN CAMILO MORENO SEPÚLVEDA
SERGIO ALBERTO MORA ALBARRACÍN**

Trabajo de Grado en modalidad proyecto de investigación para optar el título de:
INGENIERO CIVIL

DIRECTOR
LUIS EDUARDO ZAPATA ORDUZ
Ingeniero Civil, MSc., M. Eng., PhD.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

Dedicatoria

A **Dios** por darme la sabiduría necesaria para completar esta etapa y por darme la fuerza necesaria para no renunciar no ceder ante las dificultades.

A **mis padres** por poner su confianza en mí, apoyarme de manera incondicional y ser parte importante de este proceso de aprendizaje.

A **mis hermanas** por su interés, apoyo y compañía, que me motivaron a completar esta ardua tarea

A **Ambrosio Carrillo** por sus palabras de aliento, su apoyo emocional y técnico en el desarrollo solo de este proyecto.

A **mis Amigos** por su interés y apoyo en el desarrollo de todas mis actividades

Sergio Alberto Mora Albarracín

Dedicatoria

A cada una de las personas que estuvieron presentes y que de alguna manera aportaron para poder llegar al final de esta etapa tan importante de mi vida.

TE AMO MADRE!

Cristian Camilo Moreno Sepúlveda

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) por el financiamiento del proyecto de investigación; a Luis Eduardo Zapata Ordúz, director del proyecto, por su constante apoyo y dedicación en la totalidad del proyecto; al personal de apoyo del Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil; a los Laboratorios de Microscopía y Rayos X adscritos a la Escuela de Química en el Parque Tecnológico Guatigará, por sus servicios prestados para la obtención de resultados; al Laboratorio de Pirometalurgia de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por el suministro de equipos y materiales para los ensayos realizados.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	18
1. OBJETIVOS.....	20
1.1 Objetivo general.....	20
1.2 Objetivos específicos.....	20
2. FASE EXPERIMENTAL.....	22
2.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	22
2.1.1 Agregado grueso.....	22
2.1.1.1 Granulometría ..	22
2.1.1.2 Densidad y absorción ..	24
2.1.1.3 Masa unitaria.....	24
2.1.1.4 Contenido de humedad.....	24
2.1.2 Agregado fino ..	24
2.1.2.1 Granulometría.....	24
2.1.2.2 Densidad y absorción ..	25
2.1.2.3 Contenido de humedad.....	25
2.1.2.4 Contenido de materia orgánica.....	26
2.1.3 Cemento.....	27
2.1.4 Escoria de alto horno (BF) ..	27
2.1.5 Nanopartículas de sílice.....	29
2.1.6 Plastificante	30
2.2 METODOLOGÍA ESTADÍSTICA	30
2.2.1 Diseño de experimentos.....	30
2.2.2 Diseño central compuesto y superficie de respuesta.....	30
2.3 DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO	31

2.3.1	Metodología de diseño de mezclas de concreto.....	31
2.3.2	Procedimiento de mezclado.....	33
2.4	PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES.....	33
2.4.1	Control de mezclas de concreto.....	33
2.4.2	Fundición de probetas.....	39
3.	OPTIMIZACIÓN ESTADÍSTICA	40
3.1	RESULTADOS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL.....	40
3.2	MODELO ESTADÍSTICO.....	41
3.2.1	Análisis de varianza 7 y 28 días (ANOVA Original).....	41
3.2.2	Análisis de varianza 7 y 28 días (ANOVA Depurado).....	43
3.2.3	Ecuaciones del modelo a 7 y 28 días.....	44
3.2.4	Análisis de gráfica de contorno y superficie de respuesta 7 días.....	46
3.2.5	Análisis de gráfica de contorno y superficie de respuesta 28 días.....	48
3.2.6	Optimización por compresión uniaxial a 28 días.....	49
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52
4.1	ESTADO FRESCO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO	52
4.1.1	Consistencia normal y tiempos de fraguado.....	52
4.1.2	Asentamiento en cono.....	53
4.1.3	Densidad del concreto.....	53
4.2	ESTADO ENDURECIDO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO.....	54
4.2.1	Resistencia a compresión.....	54
4.2.2	Resistencia a la tensión indirecta.....	57
4.2.3	Indicación rápida de la permeabilidad a la penetración del ion cloruro.....	59
5.	CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL	63
5.1	MICROSCOPIA DE BARRIDO ELECTRÓNICO SEM.....	63
5.1.1	Análisis SEM para la mezcla de concreto control (P0).....	64
5.1.2	Análisis SEM para la mezcla de concreto optimizada (P*).....	65
5.2	DIFRACCIÓN DE RAYOS X DRX.....	67
5.2.1	Análisis DRX para la mezcla de concreto control (P0).....	67
5.2.2	Análisis DRX para la mezcla de concreto optimizada (P*).....	68

6. CONCLUSIONES.....70
BIBLIOGRAFÍA.....72

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resumen de la caracterización de los agregados.....	26
Tabla 2. Composición química del cemento Portland.....	26
Tabla 3. Características químicas de la escoria de alto horno.....	29
Tabla 4. Cantidades de reemplazo de material cementante.....	33
Tabla 5. Análisis de varianza para 7 días ANOVA significancia de factores (Original).....	41
Tabla 6. Análisis de varianza para 28 días ANOVA significancia de factores (Original).....	42
Tabla 7. Análisis de varianza para 7 días ANOVA significancia de factores (Depurado).....	44
Tabla 8. Análisis de varianza para 28 días ANOVA significancia de factores (Depurado).....	44
Tabla 9. Coeficientes de los Factores de entrada del análisis estadístico.....	46
Tabla 10. Resultado ensayos de consistencia normal y tiempos de fraguado.....	52
Tabla 11. Resultado ensayos de densidad del concreto.....	53
Tabla 12. Resultados Ensayo de penetración al ion cloruro.....	62

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Tamices para agregado grueso.....	23
Imagen 2. Ensayo de contenido de materia orgánica.....	26
Imagen 3. Escoria de alto horno litificada.....	28
Imagen 4. Escoria de alto horno molida y tamizada.....	28
Imagen 5. Envase de un litro de nanopartículas de sílice.....	29
Imagen 6. Asentamiento en cono (P0): time 1 min (S = 85 mm).....	34
Imagen 7. Asentamiento en cono (P1): time 1 min (S = 168 mm).....	34
Imagen 8. Asentamiento en cono (P2): time 1 min (S = 138 mm).....	35
Imagen 9. Asentamiento en cono (P3): time 1 min (S = 155 mm).....	35
Imagen 10. Asentamiento en cono (P4): time 1 min (S = 158 mm).....	36
Imagen 11. Asentamiento en cono (P5): time 1 min (S = 145 mm).....	36
Imagen 12. Asentamiento en cono (P6): time 1 min (S = 83 mm).....	37
Imagen 13. Asentamiento en cono (P7): time 1 min (S = 80 mm).....	37
Imagen 14. Asentamiento en cono (P8): time 1 min (S = 157mm).....	38
Imagen 15. Asentamiento en cono (P9): time 1 min (S = 165 mm).....	38
Imagen 16. Asentamiento en cono (P*): tiempo 1 min (S = 113 mm).....	53
Imagen 17. Especímenes de concreto endurecido para ensayo de ion cloruro.....	60
Imagen 18. Equipo Perma2™.....	60
Imagen 19. Montaje final para ensayo de ion cloruro.....	61
Imagen 20. Muestras de concreto para prueba SEM.....	63
Imagen 21. Matriz cementicia de la mezcla control P0.....	64
Imagen 22. Falla mecánica en la mezcla control P0.....	65
Imagen 23. Matriz cementicia de la mezcla optimizada P*.....	66
Imagen 24. Falla mecánica en la mezcla optimizada P*.....	67

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Granulometría agregado grueso.....	23
Figura 2. Granulometría agregado fino.....	25
Figura 3. Diseño estadístico central compuesto (k=2).....	31
Figura 4. Gráfica de resultados de asentamiento en cono.....	39
Figura 5. Resultados promedio de resistencia a compresión uniaxial 7 y 28 días....	40
Figura 6. Gráfica de análisis de varianza ANOVA para 7 días (Original).....	42
Figura 7. Gráfica de análisis de varianza ANOVA para 28 días (Original).....	43
Figura 8. Gráfica de análisis de varianza ANOVA para 7 días (Depurado).....	44
Figura 9. Gráfica de análisis de varianza ANOVA para 28 días (Depurado).....	45
Figura 10. Gráfica de contorno de resistencia a la compresión a 7 días.....	47
Figura 11. Superficie de respuesta para la resistencia a compresión a 7 días.....	47
Figura 12. Gráfica de contorno de resistencia a la compresión a 28 días.....	48
Figura 13. Superficie de respuesta para la resistencia a compresión a 28 días.....	49
Figura 14. Punto máximo de reemplazo de BF en nS = 1.5% de superficie de respuesta para la resistencia a compresión a 28 días.....	50
Figura 15. Gráfica de resistencia a compresión muestra P0 y P* a 7 días.....	55
Figura 16. Gráfica Intervalo de confianza para la resistencia a compresión a 7 días.....	55
Figura 17. Gráfica de resistencia a compresión muestra P0 y P* a 28 días.....	56
Figura 18. Gráfica Intervalo de confianza para la resistencia a compresión a 28 días.....	57
Figura 19. Gráfica de resistencia a tensión indirecta muestra P0 y P* a 28 días.....	58
Figura 20. Gráfica Intervalo de confianza para la resistencia a tensión indirecta a 28 días.....	59

Figura 21. Gráfica Intervalo de confianza para la durabilidad por penetración a ion cloruro a 28 días.....	62
Figura 22. Composición química de la mezcla de control P0.....	68
Figura 23. Composición química de la mezcla de control P0.	69

RESUMEN

TÍTULO: COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA DE CONCRETO EN PRESENCIA DE ESCORIA Y NANO-SÍLICE OPTIMIZADA POR RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO.*

AUTORES: MORA ALBARRACÍN SERGIO ALBERTO.
MORENO SEPÚLVEDA CRISTIAN CAMILO.†

PALABRAS CLAVE: Compresión uniaxial, escoria de alto horno, nano-sílice, superficie de respuesta.

DESCRIPCIÓN:

En la industria de la construcción, el uso de materiales alternativos para mitigar los efectos negativos en el medio ambiente es fuente de investigación, por lo tanto, en el presente estudio se realiza un análisis estadístico basado en la compresión uniaxial de diseños de mezcla de concreto con reemplazo de la masa total de cemento por escoria de alto horno hasta 40% y para evitar pérdidas mecánicas se emplearon nanopartículas de sílice hasta 1.5%. El modelo estadístico consistió en un diseño del tipo central compuesto realizado en diversas mezclas de concreto a edad de 28 días con relación agua/cemento de 0.50 y cantidad de agregados constante para reducir variables en el modelo. Los resultados mostraron un comportamiento estadístico significativo en la curvatura de la superficie de respuesta a edad de maduración del concreto de 28 días, por lo tanto, este hecho se empleó para determinar los reemplazos óptimos de escoria y nanopartículas de sílice en la mezcla. Posteriormente se procedió a estudiar las principales propiedades físico-mecánicas en estado fresco y endurecido de la mezcla optimizada, y caracterizar micro-estructuralmente su matriz cementicia; teniendo como punto de comparación una mezcla convencional de concreto donde los resultados muestran los efectos generados por dichas adiciones en la mezcla de concreto optimizada.

* Trabajo de Grado

† Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Luis Eduardo Zapata Ordúz, Ingeniero Civil, MSc., M. Eng., PhD

ABSTRACT

TITLE: MECHANICAL BEHAVIOR OF A CONCRETE MIXTURE IN PRESENCE OF BLAST FURNACE SLAG AND NANO-SILICA OPTIMIZED BY RESISTANCE TO UNIAXIAL COMPRESSION THROUGH STATISTICAL ANALYSIS.*

AUTHORS: MORA ALBARRACÍN SERGIO ALBERTO.
MORENO SEPÚLVEDA CRISTIAN CAMILO.†

KEYWORDS: Uniaxial compression, blast furnace slag, nano-silica, response surface.

DESCRIPTION:

In the construction industry, the use of alternative materials to mitigate negative effects on the environment is a source of research, therefore, in the present study a statistical analysis is performed based on the uniaxial compression of concrete mix designs. With replacement of the total mass of cement by blast furnace slag up to 40% and to avoid mechanical losses were used silica nanoparticles up to 1.5%. The statistical model consisted of a composite central type design made in different mixtures of concrete at age 28 days with water / cement ratio of 0.50 and quantity of aggregates constant to reduce variables in the model. The results showed a significant statistical behavior in the curvature of the maturation age response surface of the 28 days concrete, therefore, this fact was used to determine the optimal replacements of slag and silica nanoparticles in the mixture. Afterwards, the main physical-mechanical properties were studied in fresh and hardened condition of the optimized mixture, and micro-structurally characterized its cement matrix; having as a point of comparison a conventional concrete mixture where the results show the effects generated by said additions in the optimized concrete mix.

* Bachelor Thesis

† Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Luis Eduardo Zapata Ordúz, Ingeniero Civil, MSc., M. Eng., PhD.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la industria de materiales para la construcción, entre ellos el cemento Portland, tiene un gran impacto en el medio ambiente debido a su gran uso de aproximadamente diez mil millones de toneladas al año ^[1], siendo catalogado como un material con huellas negativas debido a su producción ya que durante su fabricación se presenta emanación de dióxido de carbono contenido en la piedra caliza, además de aparecer compuestos como óxido de azufre, óxido de nitrógeno y vapores de cloro y flúor que son altamente contaminantes ^[2]. En este sentido, la escoria de alto horno es una alternativa para emplear en los concretos y así reducir la cantidad de cemento requerido, esto gracias a su naturaleza reciclable ^[3,4,5] y al hecho de disponer de fuentes importantes a nivel nacional de 350.000 toneladas al año ^[6]. Sin embargo, existen muchos interrogantes acerca de su utilización ya que debido a su reducida capacidad inicial de reacción se presentan desventajas en las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, sobre todo cuando la escoria se emplea en altos reemplazos del cemento. Esta posible pérdida de sus propiedades mecánicas limita la posibilidad de aprovechar todo su potencial siendo sólo posible retirar porcentajes moderados de cemento para estar dentro de valores seguros en términos estructurales ^[7]; no obstante, los beneficios ambientales y económicos motivan a seguir trabajando con este tipo de materiales para ayudar a conservar el planeta.

Como respuesta a los efectos negativos en la resistencia del concreto por el reemplazo de cemento por escoria de alto horno, aparecen nuevos materiales como las nanopartículas que aún no son de uso común en la industria de la construcción a gran escala. Las nano-partículas de sílice debido a su elevada capacidad de reacción superficial puede favorecer los efectos químicos, físicos, mecánicos y de durabilidad en el concreto ^[8]; los principales efectos al adicionar nano-sílice al cemento Portland son el aumento significativo en el calor de hidratación de la reacción química a temprana edad ^[9], promover la reacción puzolánica en el

concreto ^[10], mejorar la microestructura de la matriz cementicia debido a que disminuye la porosidad del concreto ^[11] y el incremento en la resistencia a compresión y/o flexión ^[12,13].

Con base en la información obtenida, en el presente estudio se tiene como objetivo emplear conjuntamente grandes cantidades de escoria de alto horno (BFS, por sus siglas en inglés) con reemplazos en masa de material cementicio (wt%) que oscilan desde 0 wt% hasta 40 wt% y pequeñas cantidades de nanopartículas de sílice (nS, por sus siglas en inglés) que van desde 0.0 wt% hasta 1.5 wt%. Posteriormente, a partir de un análisis estadístico denominado diseño central compuesto ^[14] del tipo factorial 2^k ($k = 2$ factores) se obtiene una plantilla de diseños que comprende todas las mezclas de concreto que se deben realizar junto con sus réplicas para ajustar el sistema a un modelo matemático obteniéndose como resultado un comportamiento significativo en la curvatura de la superficie de respuesta para determinar una mezcla optimizada bajo criterios de compresión uniaxial a la edad de 28 días de maduración del concreto. Todos los experimentos fueron realizados empleando relación agua/materiales-cementantes (a/cm) constante en 0.50. Con los resultados de esta primera fase se realizan posteriormente estudios de durabilidad, microscopia electrónica de la interface agregado-matriz cementicia y análisis detallados de las principales propiedades físico-mecánicas en estado fresco y endurecido, de la mezcla optimizada teniendo como punto de comparación una mezcla ordinaria de concreto.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las principales propiedades fisico-mecánicas en estado fresco y endurecido de una mezcla cementicia a base de cemento portland con reemplazo de altos contenidos de escoria y mínimas cantidades de nano-partículas de sílice, optimizada para la resistencia a la compresión uniaxial del concreto (NTC 673 / ASTM C39).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar las cantidades óptimas mediante un análisis estadístico de las mezclas de concreto en presencia de escoria y/o nano-sílice bajo criterios de resistencia a la compresión uniaxial, modificando la cantidad de reemplazo de cemento Portland por escoria y la adición de nano-sílice; pero conservando la relación agua cemento y la proporción de agregados fino y grueso, con el fin facilitar el análisis de datos y reducir las variables durante los experimentos.
- Evaluar la resistencia mecánica medida por la tensión indirecta (NTC 722 / ASTM C496) y la durabilidad medida por permeabilidad a la penetración del ión cloruro (ASTM 1202*), en estado endurecido de la mezcla de concreto optimizada por resistencia a la compresión uniaxial.
- Determinar las principales características en estado fresco de la mezcla de concreto optimizada: asentamiento en cono (NTC 396 / ASTM C143), consistencia normal (NTC 110 / ASTM C187), tiempos de fraguado (NTC 118 / ASTM C191) y densidad del concreto (NTC 1926 / ASTM C138).

- Caracterizar microestructuralmente (teniendo como punto de comparación un concreto ordinario) la mezcla de concreto optimizada mediante dos pruebas: i) Difracción de rayos X (DRX) para determinar la composición química y sus respectivas fases. ii) Microscopía de barrido electrónico (SEM) con el fin de conocer la morfología de la matriz cementicia y analizar la influencia de la interfase cemento-agregado (zona de transición) en las propiedades mecánicas del concreto.

2. FASE EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Con el fin de estudiar el comportamiento mecánico de una mezcla de concreto con remplazo de escoria de alto horno y nano-sílice y eliminar la mayor cantidad de variables externas que pudiesen afectar el comportamiento de la mezcla los materiales utilizados en la presente investigación fueron caracterizados de manera cuidadosa y con sus respectivas replicas, además de tener especial cuidado en los en los realizados también se buscó mantenerlos en ambientes controlados con pocas variaciones de temperatura y humedad en el medio, para garantizar las que las condiciones de los agregados eran constantes se realizaron mediciones de humedad periódicamente y fueron almacenados en contenedores cerrados que impidiesen la mezcla de materiales u contaminación con materia orgánica u otros agregados.

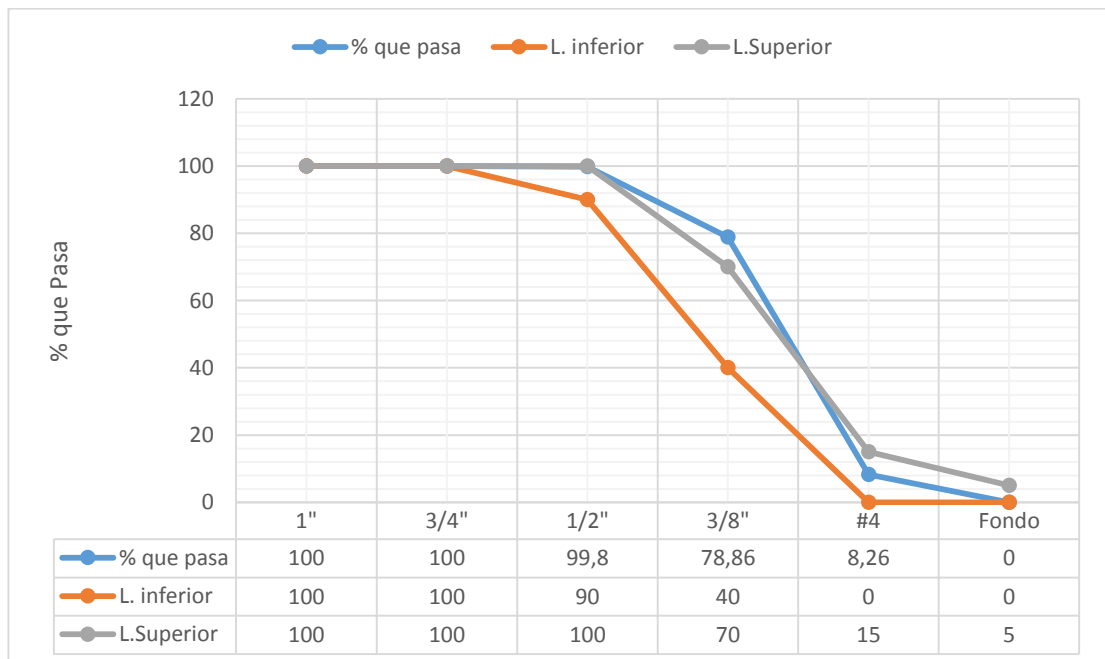
2.1.1 Agregado grueso. El agregado grueso utilizado en la presente investigación fue obtenido de la cantera del rio Chicamocha en el departamento de Santander.

2.1.1.1 Granulometría. El ensayo de granulometría de agregados se realizó siguiendo los lineamientos de la NTC 77 ^[15], Para el agregado grueso se seleccionaron 10 kilogramos de material, que pasaron por los tamices de 25.4mm, 19.05 mm, 12.7 mm, 9.5 mm y 4.75 mm como los de la Imagen 1, se movieron los tamices de manera manual durante aproximadamente 15 min y se registraron los pesos retenidos, los resultados del análisis granulométrico de acuerdo a la NTC 174 ^[16] se encuentran registrados en la Figura 1.

Imagen 1. Tamices para agregado grueso.



Figura 1. Granulometría agregado grueso.



2.1.1.2 Densidad y absorción. Para encontrar los datos de densidad y absorción del agregado grueso se siguieron las indicaciones de la NTC 176 ^[17], el agregado grueso se colocó en horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante, posterior a esto se deja la muestra sumergida en agua durante $24\text{h} \pm 4\text{h}$, se seleccionaron 2Kg de agregado, se secó superficialmente hasta que se considere en condición saturada superficialmente seca (S.S.S) y utilizando esta muestra se realiza el ensayo para determinar absorción, gravedad específica real, gravedad específica aparente y gravedad específica aparente (S.S.S); los datos obtenidos se registraron en la Tabla 1.

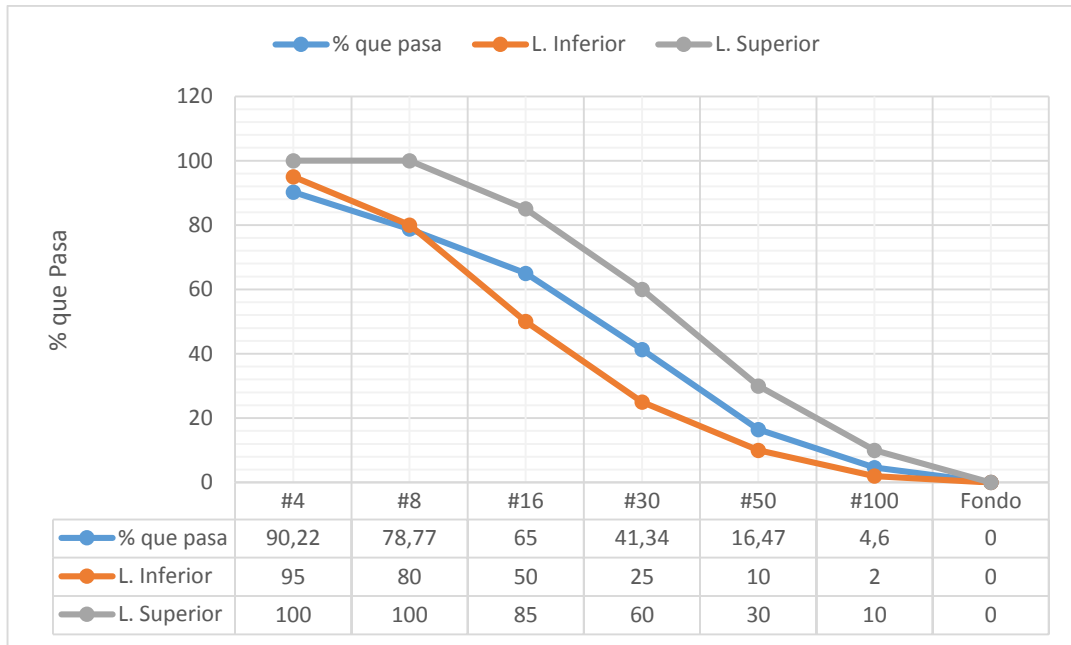
2.1.1.3 Masa unitaria. Para la determinación de masa unitaria de los agregados gruesos se siguieron las indicaciones de la NTC 92 ^[18], se seleccionó una muestra de 10 Kg de agregado grueso en condición saturada superficialmente seca y se realizó el ensayo para la determinación de peso unitario del agregado; los datos obtenidos se registraron en la Tabla 1.

2.1.1.4 Contenido de humedad. El contenido de humedad se obtuvo mediante los procedimientos indicados en la NTC 1776^[19] y se usaron 2 Kg de agregado grueso en condiciones ambientales y almacenada en el contenedor de disposición definitiva, cabe anotar que este ensayo se realizó periódicamente durante todo el desarrollo de este proyecto con el fin de controlar la humedad del agregado; los datos obtenidos se registraron en la Tabla 1.

2.1.2 Agregado fino. El agregado fino utilizado en la presente investigación fue obtenido de la cantera del río Chicamocha en el departamento de Santander.

2.1.2.1 Granulometría. El ensayo de granulometría en los agregados finos se realizó siguiendo la NTC 77, se seleccionó 1 kilogramo de material, que pasaron por los tamices de 4.76mm, 2.36mm, 1.18mm, 0.6mm, 0.3mm, 0.15mm con ayuda de una tamizadora mecánica durante aproximadamente 15 min. Ver Figura 2.

Figura 2. Granulometría agregado fino.



2.1.2.2 Densidad y absorción. Los respectivos ensayos fueron realizados según la NTC 237 ^[20] este ensayo se realizó una muestra de 0.5 Kg de agregado fino y los resultados fueron gravedad específica y absorción. Ver Tabla 1.

2.1.2.3 Contenido de humedad. Este ensayo se realizó conforme los procedimientos indicados en la NTC 1776 y se usaron 0.5 Kg de agregado fino en condiciones ambientales y almacenada en el contenedor de disposición definitiva, cabe anotar que este ensayo se realizó periódicamente durante todo el desarrollo de este proyecto con el fin de controlar la humedad del agregado. Ver Tabla 1

Tabla 1. Resumen de la caracterización de los agregados.

Agregado	Fino	Grueso
Tamaño máximo	-----	0.50
Tamaño máximo Nominal	-----	9.50
Peso unitario Suelto	1046.80	1484.40
Peso Unitario Compactado	1158.72	1628.00
Densidad Especifica	2.65	2.65
Módulo de Finura	3.03	-----
Porcentaje de Absorción	0,74	0.90
Humedad	0.30	0.15

2.1.2.4 Contenido de Materia orgánica. Con el fin de encontrar el contenido de impurezas presentes en el agregado fino y determino la aceptabilidad del agregado se realizó el ensayo descrito en la NTC 127 ^[21] y se obtuvo un rango 1 de contenido de materia orgánica, para ello se utilizaron alrededor de 130 ml de agregado fino y una solución de hidróxido de sodio. Ver Imagen 2.

Imagen 2. Ensayo de contenido de materia orgánica.



2.1.3 Cemento. Las mezclas se realizaron con cemento portland tipo I según la NTC 121 [22], con peso específico de 3.1 calculado mediante los procedimientos establecidos en la NTC 221 [23], proveniente de la empresa CEMEX la cual proporcionó la ficha técnica de este material con algunas de sus características físico-químicas, Ver Tabla 2.

Tabla 2. Composición química del cemento Portland.

Composición química (%)	Compuesto	Cantidad
	SiO ₂	20.17
	Al ₂ O ₃	5.20
	Fe ₂ O ₃	3.44
	CaO	56.54
	MgO	2.13
	SO ₃	3.44
	Na ₂ O	0.80
	K ₂ O	0.65

Fuente: Planta Caracolito, CEMEX Colombia.

2.1.4 Escoria de alto horno (BF). Uno de los materiales de mayor relevancia en el proceso de investigación es la escoria de alto horno el cual a partir de ahora será denominado mediante las siglas BF (Blast Furnace Slag), proveniente de la fundición de acero en la planta de acerías Paz de Rio (Boyacá, Colombia) es un material de característica reciclable, con altos contenidos de óxidos ácidos, óxidos básicos y altos contenidos de material vítreo, esta composición química la convierte en una puzolana viable para el reemplazo de material cementante, algunos componentes químicos de este material se han registrado en la Tabla 3 suministrada por el distribuidor, uno de los inconvenientes que presento este material fue que al momento de la adquisición la BF, ésta había sufrido un proceso de litificación debido a largos periodos de tiempo de almacenamiento, el contacto

con la humedad del aire contribuyo a la reacción de la BF y produjo que se aglomerara en una tamaño máximo de 25.4 mm aproximadamente. Ver Imagen 3.

Imagen 3. Escoria de alto horno litificada.



Antes de realizar cualquier ensayo, se utilizó una trituradora de mandíbula y un tamiz de 0.6 mm con el fin de obtener finura necesaria para hacer el remplazo como cementante, ver Imagen 4, esta posee un peso específico de 1.5 obtenido mediante el ensayo de para determinar la densidad del cemento hidráulico NTC 221.

Imagen 4. Escoria de alto horno molida y tamizada.



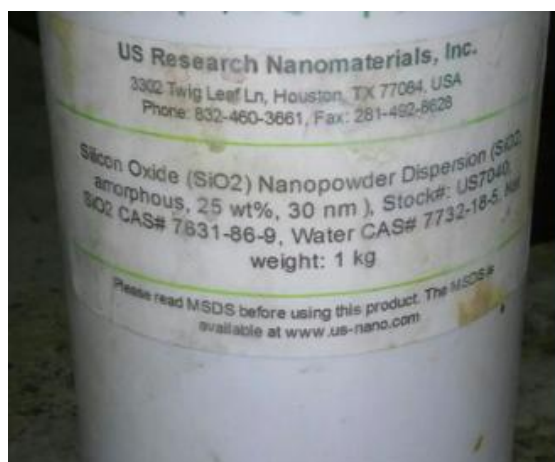
Tabla 3. Características químicas de la escoria de alto horno.

	Compuesto	Cantidad
Composición química (%)	SiO ₂	33.38
	Al ₂ O ₃	16.13
	Fe ₂ O ₃	1.03
	CaO	45.35
	MgO	1.38
	MnO	0.30

Fuente: Planta acerías paz del rio.

2.1.5 Nanopartículas de sílice (nS). Es una dilución en agua de 99.9% de SiO₂ con un tamaño de partículas entre 5 y 35 nm, se referirá a este material como nS (nano-silica), posee un peso específico de 1.7 el cual se determinó mediante el procedimiento modificado de la NTC 221, pues debido a su costo y su difícil obtención en estado sólido no es posible obtener 0.5kg del material, su forma comercial es presentada como una suspensión en agua con contenido sólido de 25%wt, ver Imagen 5, sin embargo de manera experimental se determinó que dicho contenido de sólido es del 31.5%.

Imagen 5. Envase de un litro de nanopartículas de sílice.



2.1.6 Plastificante. Con el fin de controlar la trabajabilidad de la mezcla se utilizó un aditivo plastificante este es una solución acuosa de polihidroxiolos, carbohidratos, sales de calcio tipo A, El material posee gravedad específica de 1.26 y 42.0% de contenido sólido según la NTC 1299^[24]. Este producto está diseñado comercialmente como un reductor de agua de rango medio o como reductor de cemento.

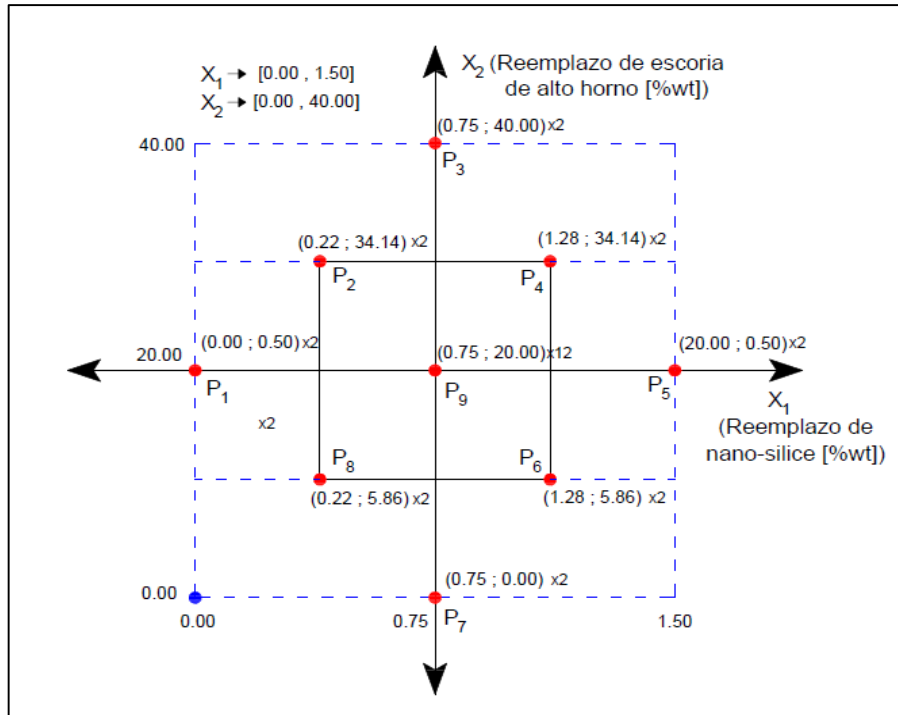
2.2 METODOLOGÍA ESTADÍSTICA

2.2.1 Diseño de experimentos. Para el desarrollo de esta investigación se utilizó la metodología de diseño de experimentos (DOE), esta metodología permite investigar los efectos de las variables de entrada en este caso se refiere a el remplazo de BF y nS, sobre una variable de salida como la resistencia a compresión a 28 días, utilizando un mínimo de experimentos posibles ^[25], para la presente investigación el método estadístico a desarrollar es el central compuesto.

2.2.2 Diseño central compuesto y superficie de respuesta. El diseño central compuesto que utiliza el diseño factorial con puntos centrales y ampliado con un grupo de puntos axiales que permiten estimar las componentes cuadráticas de los factores de entrada y modelar mediante una superficie de respuesta la variable de salida que para nuestro caso es la resistencia a compresión uniaxial la cual se determinara mediante la NTC 673 ^[26].

Con ayuda del análisis de superficie de respuesta se determinara una configuración óptima de cada factor de entrada ^[27], a continuación encontramos la configuración de remplazo de cementante utilizada en el desarrollo del proyecto y como cambiaron los remplazos de cemento por las variables de entrada BF y nS. Ver Figura 3.

Figura 3. Diseño estadístico central compuesto ($k=2$).



Con el fin de verificar el uso del análisis estadístico central compuesto se realizó en una investigación anterior un diseño factorial $2k$ con punto al centro que permitirá determinar la presencia de curvatura en al menos uno de los factores que vamos a evaluar ya sea BF o nS así como la interacción entre estas variables (Artículo en proceso de publicación denominado: *Análisis estadístico bajo criterios de compresión uniaxial de mezclas de concreto con reemplazos de cemento Portland por escoria de alto horno y nano-partículas de sílice*), el diseño de experimentos y la configuración de estos fueron obtenidos mediante el programa Minitab v16®.

2.3 DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO

2.3.1 Metodología de diseño de mezclas de concreto. Para la determinación de las cantidades de mezclas se realizó un diseño volumétrico siguiendo el procedimiento dado en la norma ACI 211 [28] con modificaciones de reemplazo de

BF y nS, en todos los diseños de mezclas se tuvieron algunas consideraciones con el fin de mantener la variabilidad estadística lo menor posible, entre estas está el mantener una relación agua cementante de 0.5 ($w/b=0.5$) al igual que el agregado grueso, el agregado fino se mantuvo con variaciones mínimas determinadas únicamente por el método de diseño, debido al efecto de la nano-sílice es probable que la trabajabilidad de las mezclas disminuya es por eso que se usó plastificante con el fin de reducir la cantidad de agua requerida, la cantidad de plastificante de la mezcla se modificó de manera tal que todas las mezclas cumplieran con un asentamiento mínimo.

Todas los puntos a diseñar fueron replicadas el numero veces requeridas por el modelo estadístico central compuesto adicional a las réplicas requeridas en cada uno de los puntos de diseño se fundieron una probeta más, esto con el fin prever posibles fallas en la medición de los resultados de compresión relacionados comportamientos inusuales de las mezclas de concreto producto de factores externos al comportamiento de los materiales en la mezcla.

En total se fundieron un total de 84 probetas de las cuales 42 fueron falladas para un tiempo de curado de 7 días y las restantes falladas a 28 días, cada una con la configuración de reemplazos requeridas por el modelo estadístico incluyendo una muestra denominada P0 la cual es la configuración de un mezcla de concreto convencional sin reemplazos de BF y nS, la cual usaremos como control y comparación de resultados, la Tabla 4 muestra las cantidades de reemplazo por metro cubico.

Tabla 4. Cantidades de reemplazo de material cementante.

Mezcla	Cemento [kg/m ³]	BF [kg/m ³]	nS [kg/m ³]	Plastificante wt%
P0	456.00	0.00	0.00	1.00
P1	380.00	76.00	0.00	2.00
P2	339.40	115.87	0.75	2.00
P3	324.00	129.59	2.43	1.00
P4	336.70	114.96	4.31	1.00
P5	375.30	75.06	5.63	1.00
P6	425.60	24.94	5.45	1.00
P7	452.60	0.00	3.39	1.00
P8	429.90	25.19	0.95	1.00
P9	377.60	75.53	2.83	1.00

2.3.2 Procedimiento de mezclado. Todas las muestras se mezclaron de manera manual durante 15 minutos aproximadamente, durante este proceso se mezcló en seco los materiales finos como agregado fino, cemento y BFS durante 1 o 2 minutos de manera uniforme, posteriormente se adiciona el agregado grueso hasta cumplir 5 minutos, Se agregó tres cuartas partes del agua requerida y se continua con el mezclado 5 minutos mas, el restante de agua se separa en 2 contenedores y se adiciona el plastificante y la nS en suspensión, una vez humedecida se agregan al concreto y se continua batiendo durante otros 5 minutos.

2.4 PREPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

2.4.1 Control de mezclas de concreto. Con el fin de controlar las mezclas de concreto se realizaron ensayos de asentamiento bajo las indicaciones de la NTC 396 ^[29] a 1 minuto, ver Imágenes 6 - 15 y a 5 minutos bajo el criterio de asentamiento superiores a 75 mm, con el fin de garantizar la trabajabilidad considerando que son mezclas de baja fluidez debido al uso de un aditivo reductor de agua de rango medio, los resultado de estos ensayos de asentamiento se consignaron en la Figura 4.

Imagen 6. Asentamiento en cono (P0): time 1 min (S = 85 mm).



Imagen 7. Asentamiento en cono (P1): time 1 min (S = 168 mm).



Imagen 8. Asentamiento en cono (P2): time 1 min (S = 138 mm).



Imagen 9. Asentamiento en cono (P3): time 1 min (S = 155 mm).



Imagen 10. Asentamiento en cono (P4): time 1 min (S = 158 mm).



Imagen 11. Asentamiento en cono (P5): time 1 min (S = 145 mm).



Imagen 12. Asentamiento en cono (P6): time 1 min ($S = 83 \text{ mm}$).



Imagen 13. Asentamiento en cono (P7): time 1 min ($S = 80 \text{ mm}$).



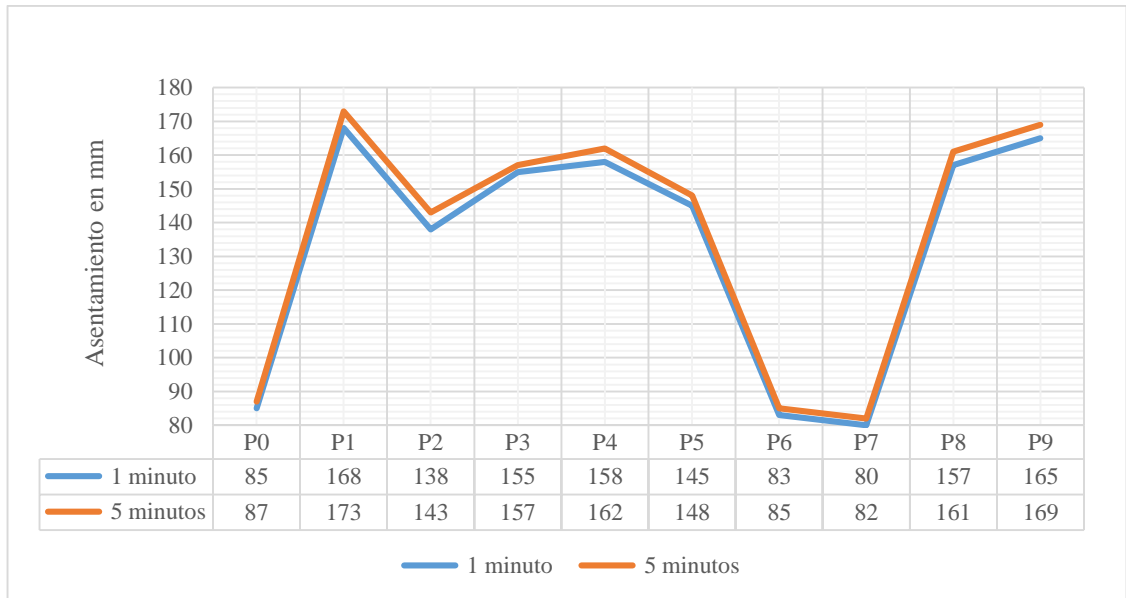
Imagen 14. Asentamiento en cono (P8): time 1 min (S = 157mm).



Imagen 15. Asentamiento en cono (P9): time 1 min (S = 165 mm).



Figura 4. Gráfica de resultados de asentamiento en cono.



2.4.2 Fundición de Probetas. El procedimiento de colada se moldeo cada muestra en 2 capas según el método determinado por la NTC 1377^[30], cilindros utilizados por las pruebas tienen 75 mm de diámetro y 150 mm de altura. Después de la colada los cilindros se desencofraron manualmente después de 24 h \pm 4h se mantuvieron en una pila de agua a una temperatura de 21°C \pm 2 ° C tal como lo indica la NTC 3512 ^[31] y se curaron para 7 y 28 días con el fin de realizar los ensayos a compresión uniaxial.

Con el fin de eliminar variaciones en el resultado las mezclas productos del factor humanos las mezclas a 7 y a 28 días se prepararon simultáneamente y con las mismas cantidades por metro cubico.

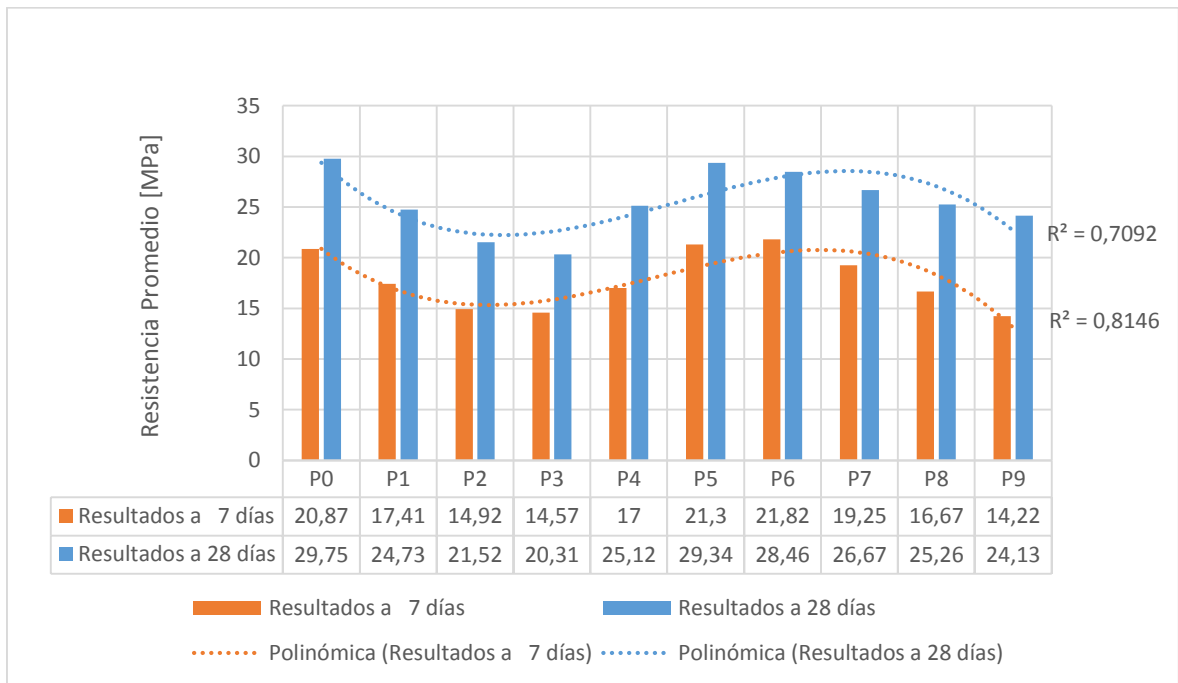
3. OPTIMIZACIÓN ESTADÍSTICA

Para la mayoría de las estructuras que se diseñan se considera que el concreto soportara cargas a compresión, es debido a esto que en esta investigación se principal criterio de optimización a la resistencia a la compresión.

3.1. RESULTADOS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL

Una vez que se cumple los tiempos de curado cada uno de los especímenes de concreto fue fallado por resistencia a compresión uniaxial según el procedimiento indicado en la NTC 673 para 7 y 28 días según corresponda, a continuación se muestran los resultados promedio para cada uno de los puntos del diseño estadístico. Ver Figura 5.

Figura 5. Resultados promedio de resistencia a compresión uniaxial 7 y 28 días.



Si se observa las líneas de tendencia central de la Figura 5 vemos como el comportamiento de la resistencia a compresión en cada uno de los remplazos no se ve afectado con el paso del tiempo y se siguen ajustando a una regresión polinómica de grado 3.

3.2 MODELO ESTADÍSTICO

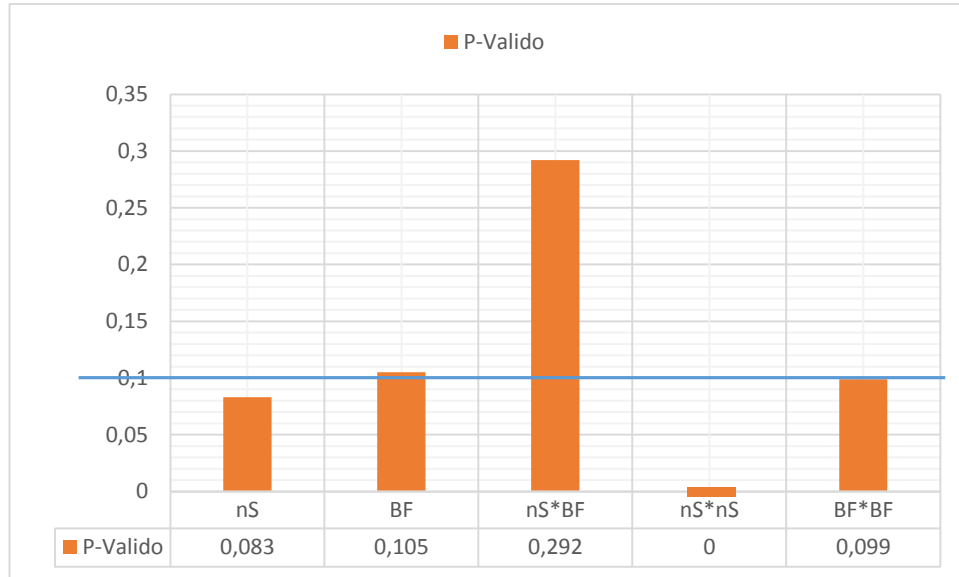
3.2.1 Análisis de varianza 7 y 28 días (ANOVA Original). Una vez determinada la resistencia a compresión, se procede a ingresar los resultados en el programa Minitab V16 ® y a continuación se ejecuta un análisis de varianza que permitirá evaluar el comportamiento de la curvatura con el fin de cuantificar los efectos de cada uno de los factores de entrada se establece un nivel de significancia de 0.1 (10%) (Remplazo de nS y remplazo de BF), para determinar si uno de los factores es relevante o no, el valor de P-válido no debe superar este nivel de significancia previamente establecido como valor de error tipo I (error alpha), en el caso de superar el nivel de significancia se considera que los efectos de dicha variable de entrada no afectan la resistencia a la compresión uniaxial.

A continuación se presentan los resultados de los análisis de varianza realizados para la resistencia a compresión a 7 días. Ver Tabla 5 y Figura 6.

Tabla 5. Análisis de varianza para 7 días ANOVA significancia de factores (Original)

Factor		F	P-válido	Significancia
Lineal	nS	3.32	0.083	SI
	BF	2.87	0.105	SI
Cuadrado	nS*nS	17.82	0.00	SI
	BF*BF	2.98	0.099	SI
Interacción	nS*BF	1.34	0.292	No

Figura 6. Grafica de análisis de varianza ANOVA para 7 días (Original)

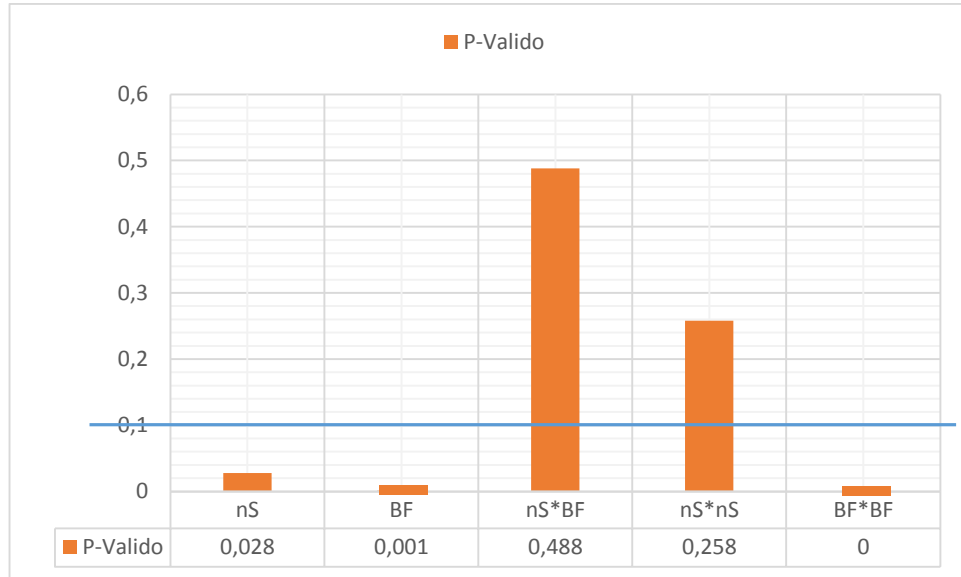


Se observa como los el grado de significancia de la componente de la interacción entre los reemplazos de cementante nS*BF supera el valor mínimo indicado lo que nos lleva a descartarla como factor influyente en el comportamiento de la resistencia a compresión, es por eso que en este momento se procede a eliminarla, utilizando los resultados para 28 días registrados en la Tabla 6 y Figura 7, se puede observar si estos factores son igualmente influyentes con el pasar del tiempo.

Tabla 6. Análisis de varianza para 28 días ANOVA significancia de factores (Original)

Factor		F	P	Significancia
Lineal	nS	5.53	0.028	SI
	BF	14.32	0.001	SI
Cuadrado	nS*nS	1.35	0.258	NO
	BF*BF	56.53	0.00	SI
Interacción	nS*BF	0.50	0.488	NO

Figura 7. Grafica de análisis de varianza ANOVA para 28 días (Original)



A los 28 días se observa como no solo la interacción entre los factores de entrada BF y nS sino también la componente cuadrática del nS son de poca significancia lo que en este punto denota un comportamiento lineal de esta última variable.

3.2.2 Análisis de varianza 7 y 28 días (ANOVA Depurado). La siguiente fase del análisis estadístico es la depurar los modelos y correrlos una vez más descartando los factores poco significantes, los resultados de los modelos depurados se registran en las figuras para un tiempo de curado de 7 días se encuentran en la Tabla 7 y Figura 8, así mismo los resultados del modelo depurado para 28 días se observan en la Tabla 8 y Figura 9.

Tabla 7. Análisis de varianza para 7 días ANOVA significancia de factores (Depurado)

Factor		F	P-Valido	Significancia
Lineal	nS	8.42	0.008	SI
	BF	7.56	0.011	SI
Cuadrado	nS*nS	17.70	0.00	SI
	BF*BF	2.96	0.099	SI

Figura 8. Gráfica de análisis de varianza ANOVA para 7 días (Depurado)

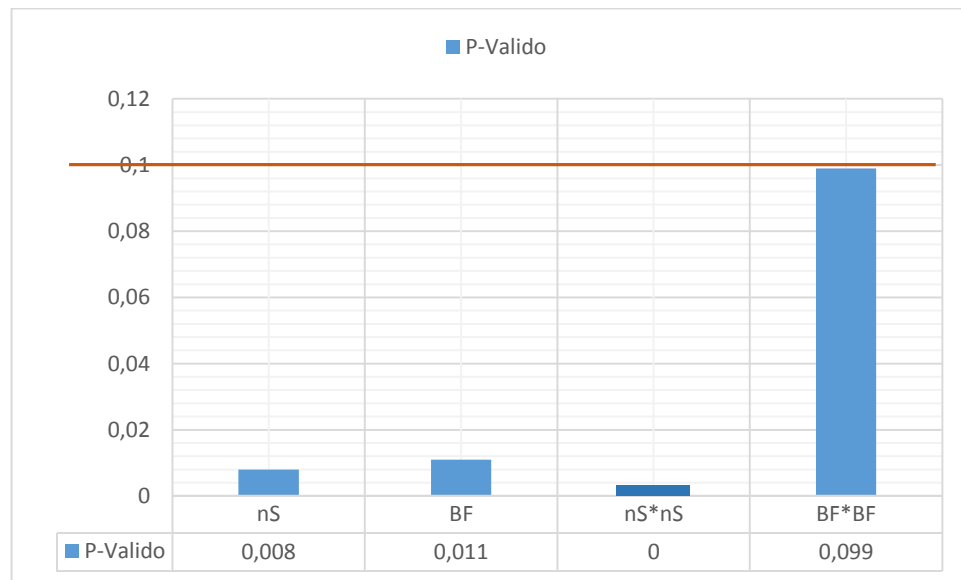
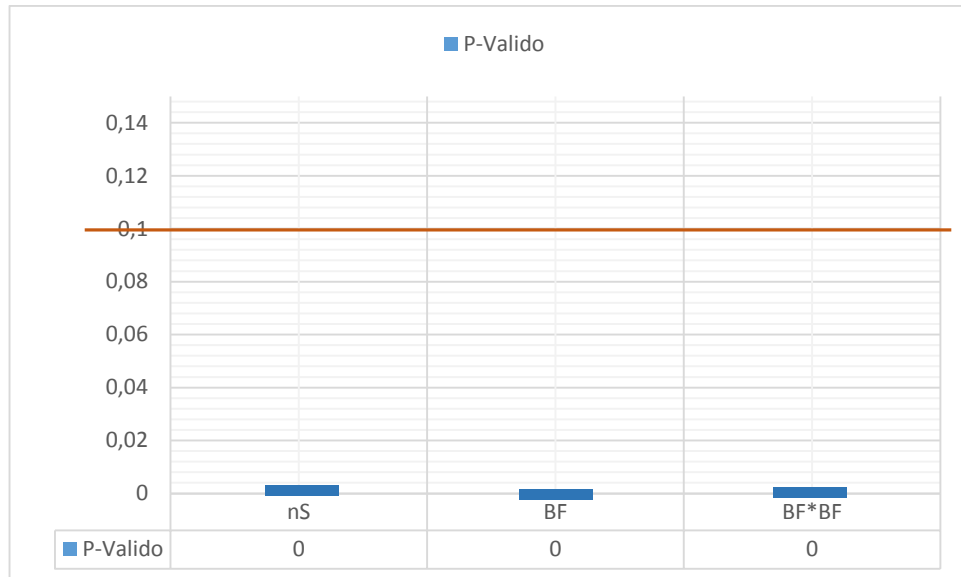


Tabla 8. Análisis de varianza para 28 días ANOVA significancia de factores (Depurado)

Factor		F	P-Valido	Significancia
Lineal	nS	44.98	0.00	SI
	BF	23.98	0.00	SI
Cuadrado	BF*BF	55.88	0.00	SI

Figura 9. Gráfica de análisis de varianza ANOVA para 28 días (Depurado)



3.2.3 Ecuaciones del modelo a 7 y 28 días. Como se puede observar en ambos modelos depurados las variables fueron significantes, una vez se corrobora la significancia de cada uno de los factores el programa Minitab V16® entrega los coeficientes de cada variable en la ecuación de modelado que permite la elaboración de una superficie de respuesta, junto con un coeficiente de determinación que permite ver el nivel de ajuste del modelo y los datos obtenidos en campo. A continuación se presentan los coeficientes correspondientes a cada factor de entrada y el coeficiente de determinación del modelo estadístico. Ver Tabla 9.

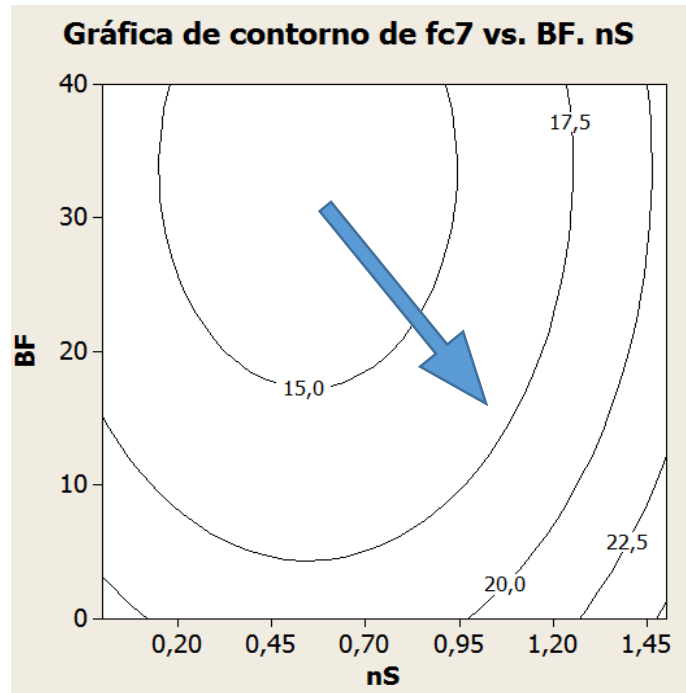
Tabla 9. Coeficientes de los Factores de entrada del análisis estadístico.

	Término	Coeficiente
Resistencia a compresión a 7 días	Constante	20.861
	nS	-8.039
	BF	-0.285
	nS*nS	7.360
	BF*BF	0.0042
Resistencia a compresión a 28 días	Constante	23.521
	nS	3.615
	BF	0.306
	BF*BF	-0.011

En el estudio anterior, mediante un diseño factorial punto al centro se determinó la linealidad de los datos en las muestras a 7 días por lo que se espera que los resultados para resistencia temprana no muestren un valor óptimo en cuanto a remplazos cementantes (BF y nS), sin embargo para un tiempo de curado de 28 días se observa la presencia de una curvatura estadísticamente significativa con lo cual se espera que existan valores óptimos de resistencia a la compresión.

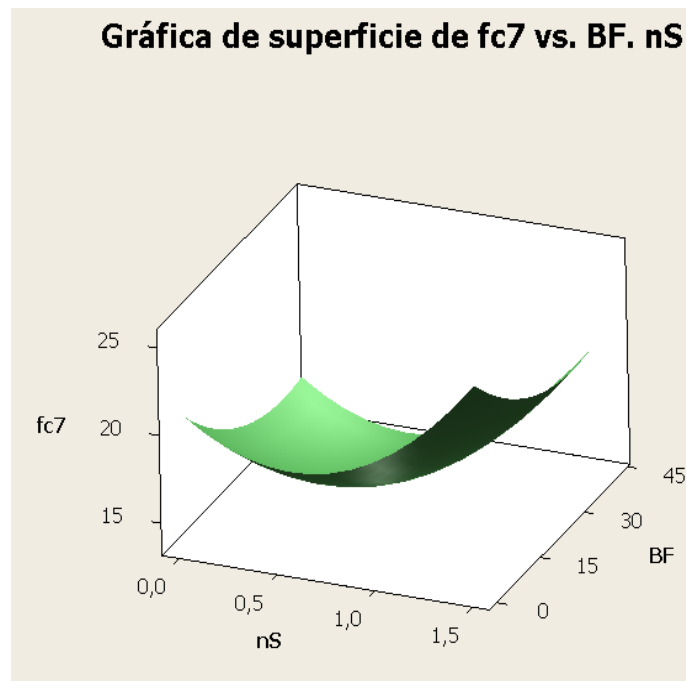
3.2.4 Análisis de gráfica de contorno y superficie de respuesta 7 días. El siguiente paso es un análisis cualitativo observando según la gráfica de superficie de respuesta generada por el modelo estadístico que me permita evaluar la curvatura presentada en la investigación anterior, se presentan las gráficas de contorno y superficie de respuesta producto del diseño estadístico central compuesto en la Figura 10 y 11 encontramos los gráficos correspondientes a la resistencia temprana (7días).

Figura 10. Gráfica de contorno de resistencia a la compresión a 7 días.



Fuente: Minitab V16®.

Figura 11. Superficie de respuesta para la resistencia a compresión a 7 días.

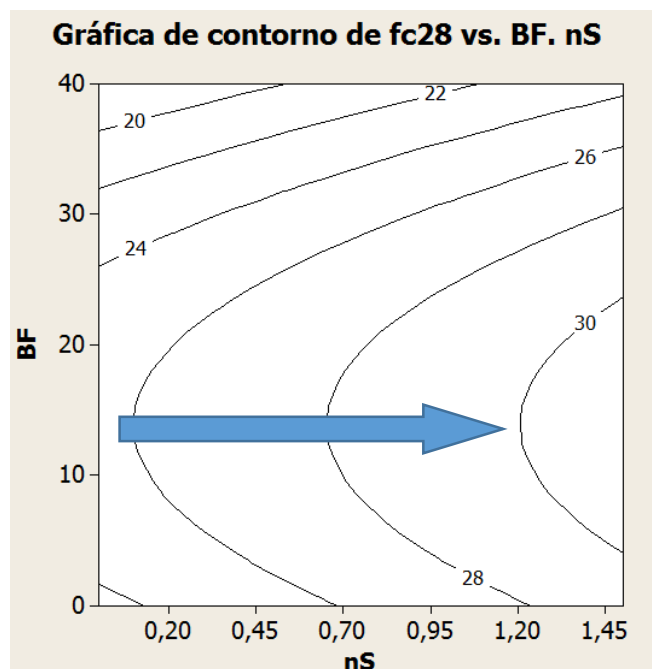


Fuente: Minitab V16®.

Sobre la gráfica de contorno es posible observar cualitativamente que el crecimiento de la variable de salida $f'c$ se va en aumento con forme se reduce la cantidad de remplazo de BF y se aumenta el de nS sin embargo si observamos la superficie de respuesta la gráfica parece indicar que no existe un óptimo visible, por el contrario la forma convexa de la superficie de respuesta indica la presencia de un mínimo, esto se puede deber al crecimiento de la función, es recomendable evaluar la curvatura a 7 días sobre una combinación de factores de entrada, con el fin de encontrar un punto en el cual se pueda presentar un valor óptimo de comportamiento.

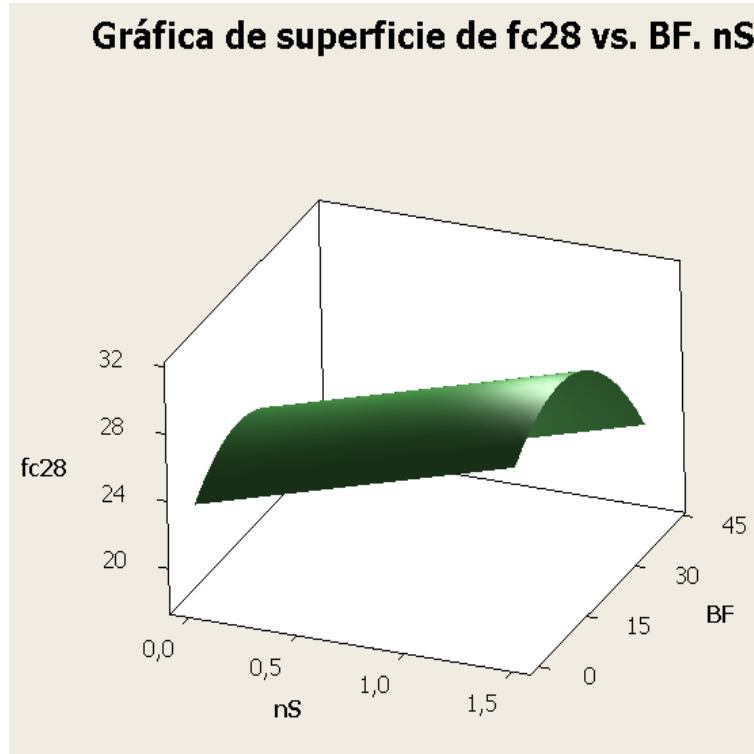
3.2.5 Análisis de gráfica de contorno y superficie de respuesta 28 días. A continuación la se presentan las grafica de contorno y de superficie de respuesta para el modelo estadístico depurado a 28 días, ver Figura 12 y 13.

Figura 12. Gráfica de contorno de resistencia a la compresión a 28 días.



Fuente: Minitab V16®.

Figura 13. Superficie de respuesta para la resistencia a compresión a 28 días



Fuente: Minitab V16®.

Para este caso tampoco es posible encontrar un valor óptimo general esto se debe a que a pesar de la existencia de un factor BF cuadrático, el comportamiento del modelo indica un crecimiento lineal respecto a la variable nS lo que indica un aumento constante de la resistencia conforme se aumenta la nano-sílice en la mezcla, sin embargo a pesar de no presentar un máximo general podemos encontrar un máximo local en el punto con mayor reemplazo de nS.

3.2.6 Optimización por compresión uniaxial a 28 días. Una vez terminado el análisis cualitativo de las superficies de respuesta podemos pasar a interpretar las gráficas de manera matemática, para el caso específico de resistencia a compresión de 28 días la presencia de curvatura y la posibilidad de encontrar un máximo local nos lleva a realizar un análisis matemático por derivadas parciales que nos permita encontrar el reemplazo máximo de BF. Ver Ecuaciones 1,2 y 3.

$$f'c = -0.0111 * BF^2 + 0.3069 * BF + 3.615 * nS + 23.521 \quad (1)$$

Igualando la derivada a parcial a cero.

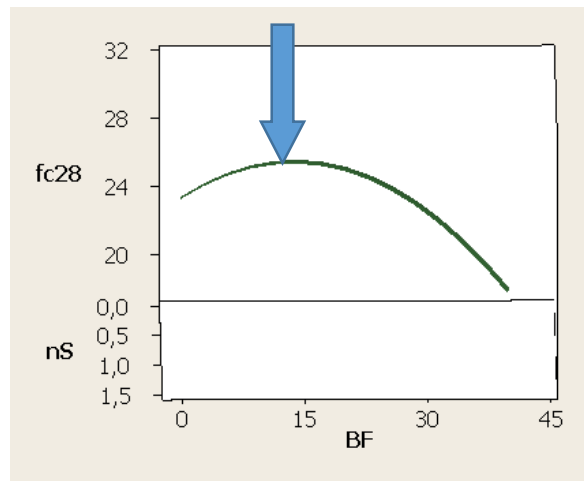
$$\frac{\partial f'c}{\partial BF} = -0.0222BF + 0.3069 = 0 \quad (2)$$

Despejamos el factor de entrada BF:

$$BF = \frac{-0.3069}{-0.0222} = 13.824 \quad (3)$$

Con estos datos se encontró que nuestro máximo local se encuentra ubicado en un remplazo de nS de 1.5% y un remplazo BF por 13.824%, Ver Figura 14, ahora que se encontró la mezcla estadísticamente óptima el siguiente paso a seguir es compararlos con un concreto sin remplazo P0 y determinar qué efectos tiene la utilización de BF y nS sobre las algunas de las propiedades de físicas del concreto.

Figura 14. Punto máximo de remplazo de BF en nS=1.5% de superficie de respuesta para la resistencia a compresión a 28 días.



Fuente: Minitab V16®.

Para futuras investigaciones es recomendable ampliar el rango de remplazo de nS para un tiempo de maduración de 28 días con el fin de observar de mejor el comportamiento de la función estadística y encontrar posibles curvaturas sobre el comportamiento del factor de entrada correspondiente al reemplazo de nS.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 ESTADO FRESCO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO

Dadas las cantidades de reemplazo óptimas el procedimiento a seguir es la realización de ensayos que me permitan estudiar el comportamiento de la mezcla con sustitución de BF y nS (P*) y compararla con un concreto convencional (P0), con el fin de evaluar la trabajabilidad de la mezcla y las diferencias en estado fresco respecto a concreto convencional puede dar una idea de la ventajas y desventajas que puede tener los reemplazos de cementante en el momento de su preparación y transporte.

4.1.1 Consistencia normal y tiempos de fraguado. Una de las principales características que afecta la trabajabilidad de una mezcla es la cantidad requerida por el material cementante es por eso que debemos evaluar qué efectos tienen los reemplazos en la cantidad de consistencia normal del material cementante y si influye en el tiempo de fraguado inicial o final, es por eso que se realizaron ensayos en consistencia normal y tiempos de fraguado según los procedimientos indicados en la NTC 110 ^[32] y NTC 118 ^[33] respectivamente. Los resultados se registraron en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultado ensayos de consistencia normal y tiempos de fraguado.

	P0	P*
Consistencia Normal (%)	29.9	29.9
Tiempo de fraguado Inicial (minutos)	165	180
Tiempo de fraguado Final (minutos)	240	210

En los resultados se puede observar que la consistencia normal no se vio afectada por los reemplazo de BF y nS, esto implica que estos reemplazos no tienen efectos considerables sobre la plasticidad del material cementante, sin embargo se puede ver que el proceso de endurecimiento final tardó aproximadamente 30 minutos más, esto se puede deber a la reacción acelerada de la nano-sílice.

4.1.2 Asentamiento en cono. El uso de plastificante como reductor de rango medio fue uno de los factores incluidos dentro del diseño de mezclas, con el fin de observar el comportamiento de agua se realizó un ensayo de asentamiento en cono según la NTC 396, los resultados de los ensayos de asentamiento para P_o y P^* se pueden observar en la Imagen 16.

Imagen 16. Asentamiento en cono (P^*): tiempo 1 min ($S = 113$ mm).



4.1.3 Densidad del concreto. Este ensayo no solo nos permitirá evaluar el efecto que tienen los reemplazos en la mezcla de concreto según la NTC 1926 [34], también puede darnos una medida indirecta a algunas otras propiedades como rendimiento, contenido de cemento y contenido de aire. Ver Tabla 11.

Tabla 11. Resultado ensayos de densidad del concreto.

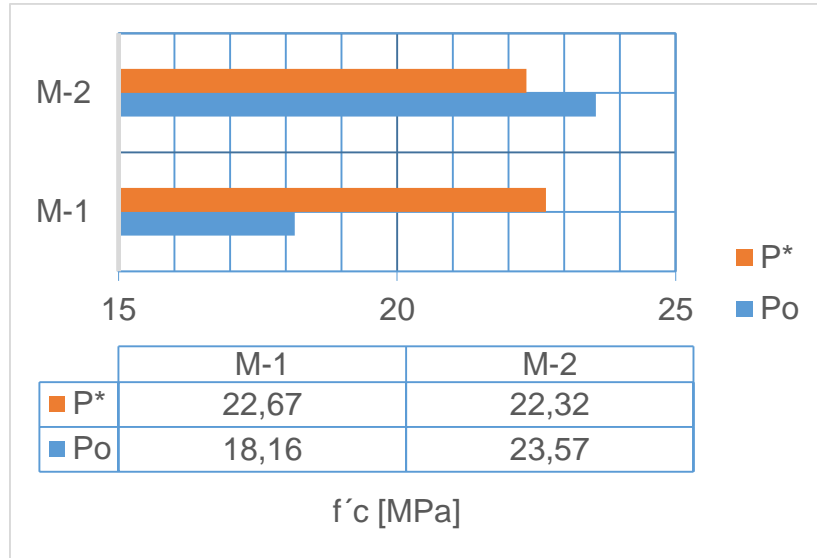
	P0	P*
Masa Unitaria (kg/m ³)	2317.1	2329
Rendimiento (m ³)	0.0051	0.0052
Rendimiento relativo	1.004	1.002
Contenido de cemento(kg/m ³)	419.85	325.17
Contenido de aire	0.469	0,192

En lo referente a las demás propiedades evaluadas salvo el contenido de aire, no se observan cambios significativos que puedan afectar el comportamiento de la mezcla, el contenido de aire bajo en la mezcla con remplazos se puede atribuir a una mejor compactación posiblemente debido al efecto de relleno de espacio de los remplazos.

4.2 ESTADO ENDURECIDO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO

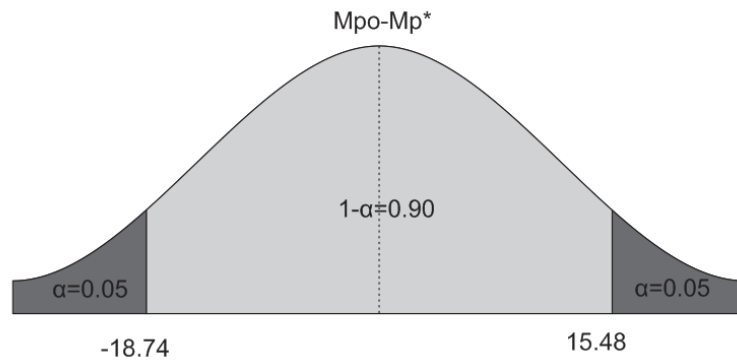
4.2.1 Resistencia a compresión. Como objetivo general de esta investigación está la optimización por compresión uniaxial con remplazo de cementante es por eso que este ensayo es uno de los principales puntos de comparación en lo que se refiere a estado endurecido según el análisis estadístico se espera una resistencia a compresión uniaxial de 31 [MPa], con el fin de observar el comportamiento de la mezcla optimizada (P*) se fundieron 4 probetas de 75mm de diámetro y 150 mm de altura y se sometieron a un ensayo de compresión uniaxial en 2 tiempos de maduración , el primero a 7 días ver Figuras 15.

Figura 15. Gráfica de resistencia a compresión muestra P0 y P* a 7 días.



Para poder dar una interpretación matemática se evaluaron los resultados mediante un intervalo de confianza, específicamente una diferencia de medias con varianzas poblacionales desconocidas y diferentes, esto se debe a que la mezcla se realizó de manera manual y no fue parte de un proceso industrial que mantuviese la variabilidad de los datos al mínimo, los límites del intervalo de confianza se representan en la Figura 16.

Figura 16. Gráfica Intervalo de confianza para la resistencia a compresión a 7 días.



Según los resultados obtenidos del intervalo de confianza la diferencia entre medias poblacionales puede tomar valores negativos o positivos lo que nos lleva a pensar que no existe una dominancia de medias, por lo que se pueden considerar iguales y cercanas entre sí, esto llevado a un análisis nos indica que para el caso de resistencia a compresión uniaxial a 7 días el comportamiento de la mezcla optimizada y el punto de control es similar.

Es bien conocido que la resistencia a 28 días de un concreto convencional ya a desarrollado un gran cantidad de su resistencia a compresión, a continuación evaluaremos los resultados de resistencia a compresión, para ello utilizaremos un intervalo de confianza con un nivel de significancia del 10% ($\alpha = 0,1$) Ver Figura 18, los resultado de resistencia a los 28 días se encuentran consignados en la Figura 17.

Figura 17. Gráfica de resistencia a compresión muestra P0 y P* a 28 días.

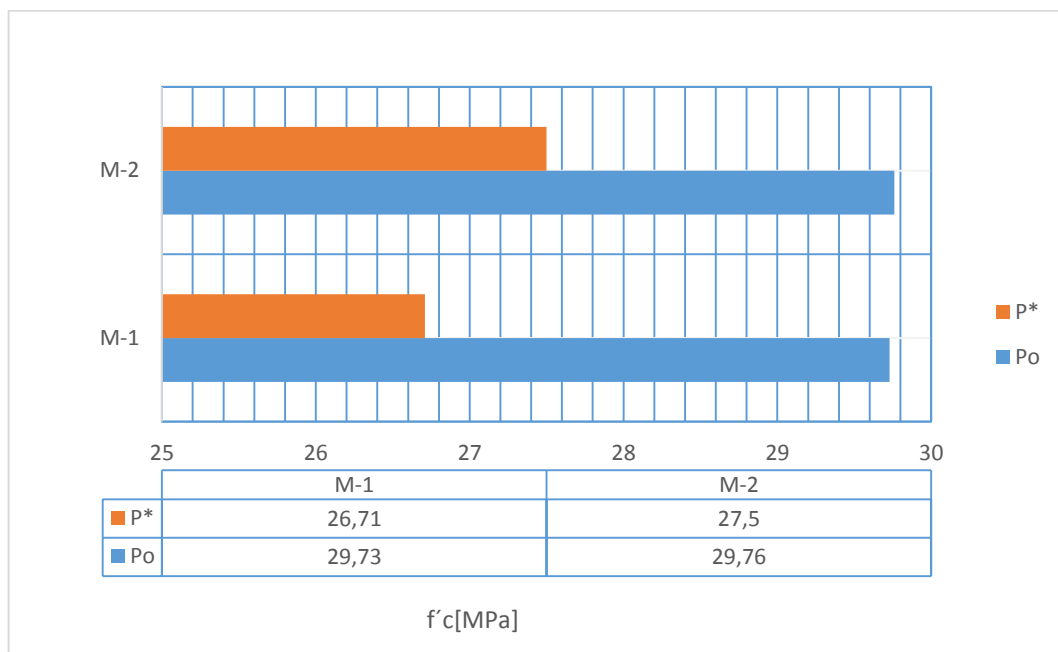
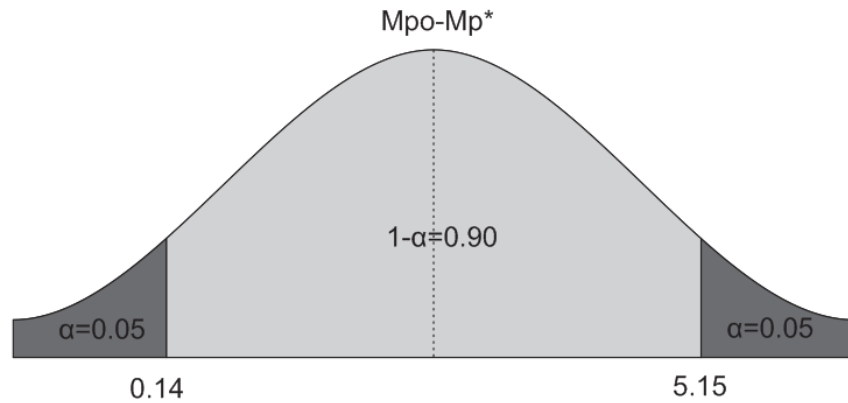


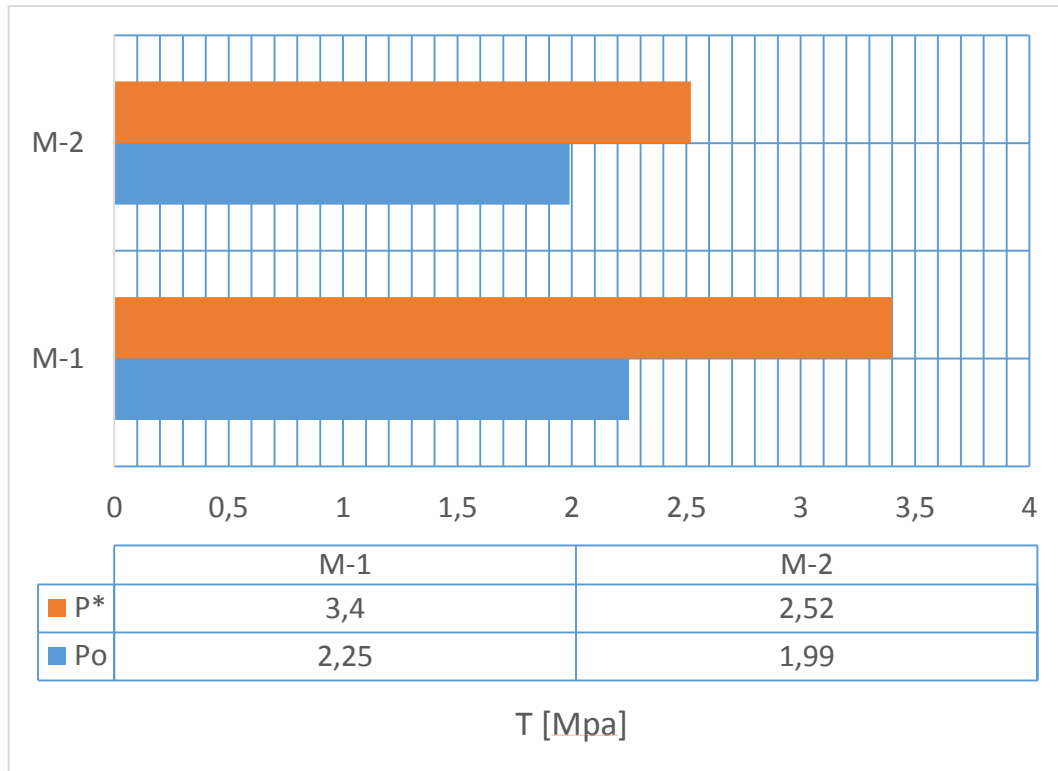
Figura 18. Gráfica Intervalo de confianza para la resistencia a compresión a 28 días.



Contrario a la resistencia a compresión encontrada anteriormente se pudo ver que en este caso la media de resistencia a compresión de la muestra con remplazo de BF y nS en cada caso del intervalo se considera menor que la muestra de concreto convencional esto debido a que la reacción puzolánica lenta de la BF no permitió que el concreto alcanzara suficiente resistencia a los 28 días, sin embargo no se descartan aumentos en la resistencia a compresión de la muestra optimizada en tiempos de maduración mayores

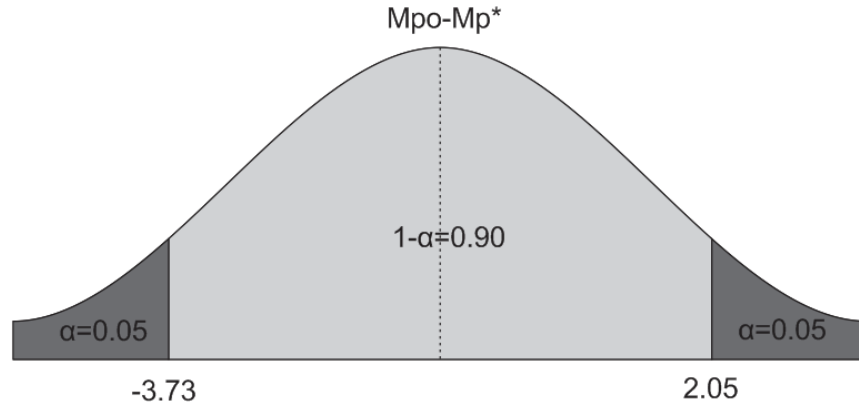
4.2.2 Resistencia a tensión indirecta. Normalmente no se requiere que un concreto convencional trabaje a tensión, sin embargo eso no implica que esta resistencia pueda ser despreciada, pues esta resistencia es de vital importancia para evaluar el agrietamiento y la propagación de estas grietas, existen 3 formas de determinar la resistencia a tensión, entre ellas se encuentra el ensayo de tensión indirecta y esta se realiza según la NTC 722 ^[35], los resultados de este ensayo se encuentran registrados en la Figura 19.

Figura 19. Gráfica de resistencia a tensión indirecta muestra P0 y P* a 28 días.



Al igual que en los ensayos anteriores para poder comparar el comportamiento a tensión de las 2 muestras de concreto (P0 y P*), para ello realizaremos un intervalo de confianza que me permita evaluar las medias poblacionales de la resistencia a tensión indirecta de cada una las muestras, en la Figura 20 podemos ver los resultados de dicho intervalo de confianza, este confirma que el comportamiento de las medias poblacionales de la resistencia a tensión son muy similares y se pueden considerar muy cercanas a una respecto a la otra, esto indica comportamientos similares y aceptables para ambos concretos.

Figura 20. Gráfica Intervalo de confianza para la resistencia a tensión indirecta a 28 días.



4.2.3 Indicación rápida de la permeabilidad a la penetración del ion cloruro. El método de prueba de la indicación eléctrica de la habilidad del concreto para resistir la penetración del ion cloruro ^[30] (ASTM 1202) no se pudo realizar debido a que la Universidad no cuenta con el equipo necesario para generar el vacío completo en las muestras de concreto endurecido, sin embargo, ésta norma ofrece un método de prueba alternativo denominado: Conductividad eléctrica en concreto endurecido ^[31] (ASTM 1760).

Éste método de prueba estándar cubre la determinación de la conductividad eléctrica en especímenes saturados de concreto endurecido para establecer una indicación rápida (1 minuto) de la resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro por difusión; los especímenes de concreto son en forma de disco de 5cm de espesor sacados de los cilindros estándar de 10x20cm como los mostrados en la imagen 17 y tienen una edad de maduración de 28 días; el equipo mostrado en la imagen 18 es utilizado para este ensayo y se denomina Perma2TM; es un dispositivo de pruebas de laboratorio creado exclusivamente para realizar éste método de prueba.

Imagen 17. Especímenes de concreto endurecido para ensayo de ion cloruro.



Imagen 18. Equipo Perma2™.



Fuente: User manual Giatec Perma2™.

La conductividad eléctrica se determina midiendo la carga eléctrica que pasa a través de todas las fases de la muestra de concreto y se logra colocando electrodos en los extremos de las celdas de los especímenes que previamente son llenadas con una solución de cloruro de sodio (NaCl) de 3% en agua destilada, el montaje final para la prueba se muestra en la imagen 19.

Imagen 19. Montaje final para ensayo de ion cloruro.



Teniendo preparado dicho montaje se aplica un voltaje de 60V durante un minuto y el dispositivo arroja los resultados de la corriente que pasó a través del espécimen de concreto en miliamperios (mA) y aplicando la formula (4) dada por la ASTM 1760 se puede obtener la conductividad dada en milisiemens por metro (mS/m), los resultados se registran en la tabla 8: el ensayo fue realizado para dos muestras de la mezcla de control (P0) y dos muestras de la mezcla de concreto optimizada (P*).

$$\sigma = K \frac{I_1 L}{V D^2} \quad (4)$$

Donde,

σ = Conductividad eléctrica , mS/m (siemens = 1/ohm).

I_1 = Corriente en 1 minuto, mA.

V = Voltaje aplicado, V.

L = Longitud del espécimen, mm.

D = Diámetro del espécimen, mm.

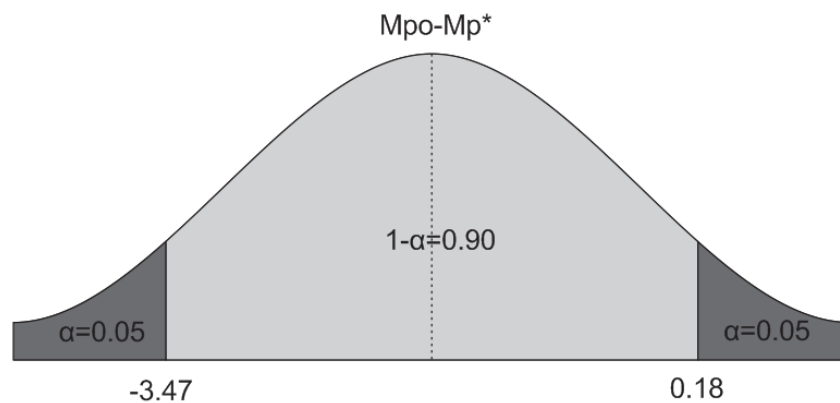
K = Factor de conversión = 1273,2.

Una vez calculada la conductancia eléctrica, se registran los valores en la Tabla 12 y se determina el intervalo de confianza en la figura 21 para calcular que tan cercanas están las medias de los valores obtenidos.

Tabla 12. Resultados Ensayo de penetración al ion cloruro.

Muestra	I [mA]	σ [mS/m]
P0 a	385.7	28.6
P0 b	393.5	29.2
PF a	404.5	30.0
PF b	419.2	31.1

Figura 21. Gráfica Intervalo de confianza para la durabilidad por penetración a ion cloruro a 28 días.



En el caso de la durabilidad medida por la penetración al ion cloruro la diferencia entre las medias poblacionales indica comportamiento similares, sin embargo en los ambos casos la penetración de ion cloruro fue superior a los valores medios indicados por concretos convencionales lo que lleva a pensar que la vida útil de estos concretos se pueden ver reducida por las sales presentes en el medio.

5. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

La caracterización microestructural se lleva a cabo en el equipo Quanta 650 FEG ambiental, mediante dos pruebas en el Laboratorio de Microscopía adscrito a la escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará; la Microscopía de Barrido Electrónico (SEM, por sus siglas en inglés Scanning Electron Microscopy) con el fin de conocer la morfología de la matriz cementicia y analizar la influencia de la interfase cemento-agregado (zona de transición) en las propiedades mecánicas del concreto; y la difracción de rayos X (DRX) para determinar la composición química y en sus respectivas fases.

5.1 Microscopía de Barrido Electrónico SEM

La morfología de la matriz cementicia se puede estudiar a partir del análisis SEM, en la imagen 20 se pueden observar las muestras de concreto en las cuales se genera un vacío absoluto para posteriormente hacer el recubrimiento de Carbono necesario para que el espécimen pueda ser estudiado en el dispositivo.

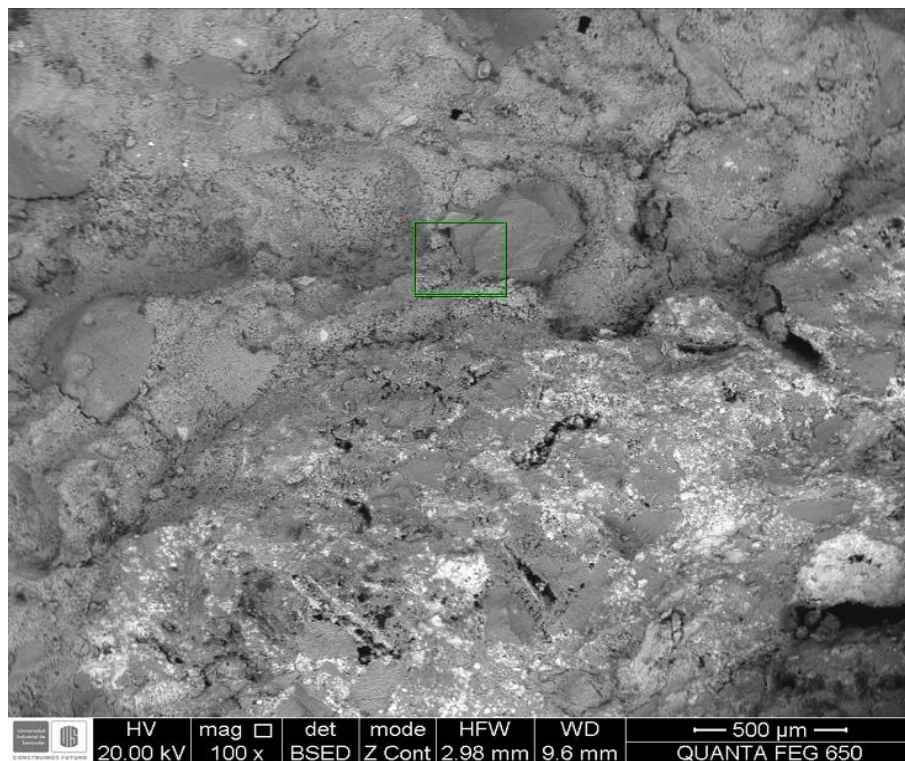
Imagen 20. Muestras de concreto para prueba SEM.



Fuente: Laboratorio de Microscopía UIS.

5.1.1 Análisis SEM para la mezcla de concreto control (P0). En la imagen 21 se observar la matriz cementicia de la mezcla de concreto control P0; las partes más oscuras representan densidades inferiores por lo que se puede decir que las coloraciones negras corresponden a los vacíos presentes en la muestra, además, se puede apreciar las zonas donde existe mayor cantidad de pasta cemento respecto a los agregados; el recuadro verde indica una zona importante en donde se puede analizar la interfase agregado-cemento.

Imagen 21. Matriz cementicia de la mezcla control P0.

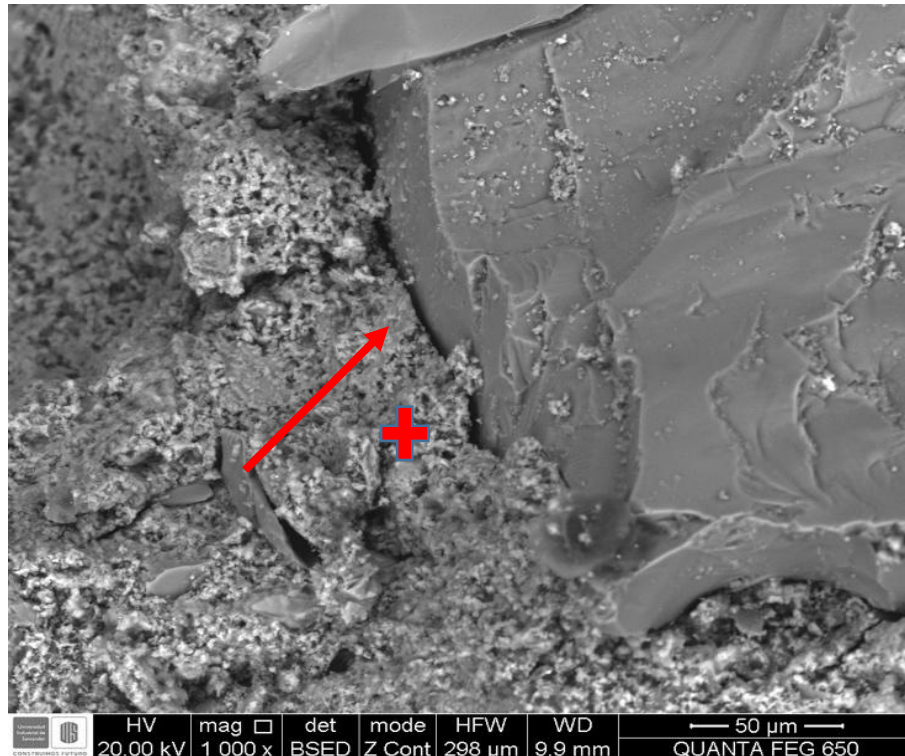


Fuente: Laboratorio de Microscopía UIS.

Al realizar una magnificación más elevada a la parte que corresponde al recuadro verde, se puede observar en la imagen 22 con más detalle la interfase agregado-cemento que presenta importancia ya que es la parte más crítica de la matriz cementicia porque allí se generan las fallas mecánicas por el desprendimiento del agregado respecto a la pasta cementante, la flecha roja indica la falla que en este

caso es producida por los esfuerzos en los ensayos de compresión uniaxial realizados a todos los especímenes de concreto.

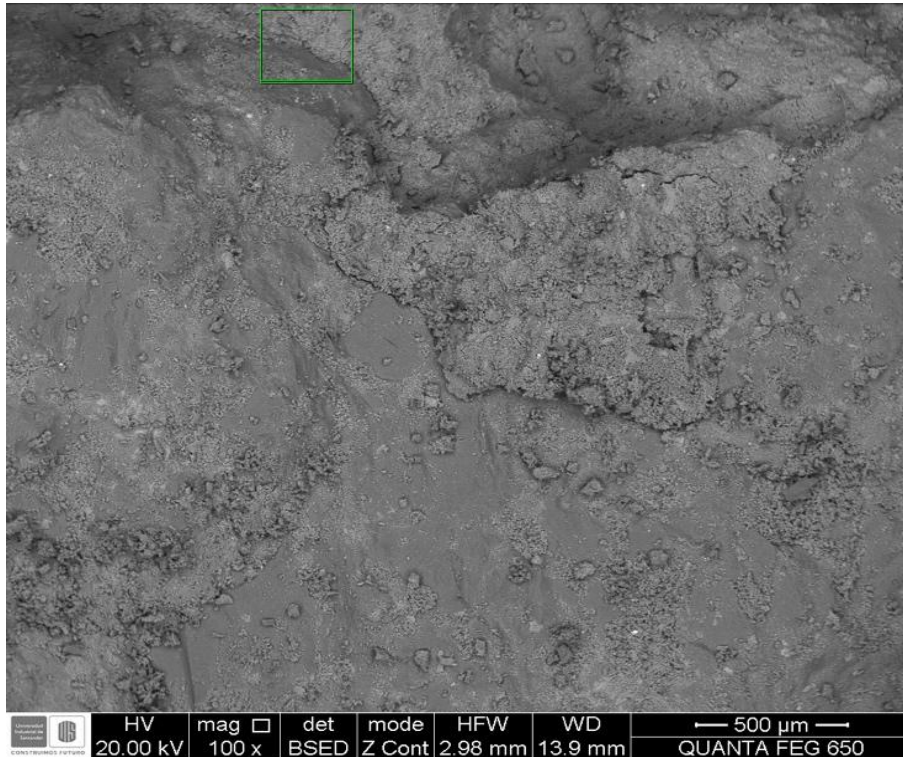
Imagen 22. Falla mecánica en la mezcla control P0.



Fuente: Laboratorio de Microscopía UIS.

5.1.2 Análisis SEM para la mezcla de concreto optimizada (P*). En la imagen 23 se puede observar la matriz cementicia de la mezcla de concreto optimizada en donde se aprecia una morfología más uniforme respecto a la muestra de la mezcla control y con mínimas zonas oscuras, esto debido a la acción de las nanopartículas que no permiten la generación de vacíos en el concreto, además se observa la buena cohesión entre cada uno de los componentes; el recuadro verde indica una zona importante en donde se puede analizar la interfase agregado-cemento y determinar si existen fallas mecánicas debido a los ensayos de compresión uniaxial realizados a todas las muestras de concreto.

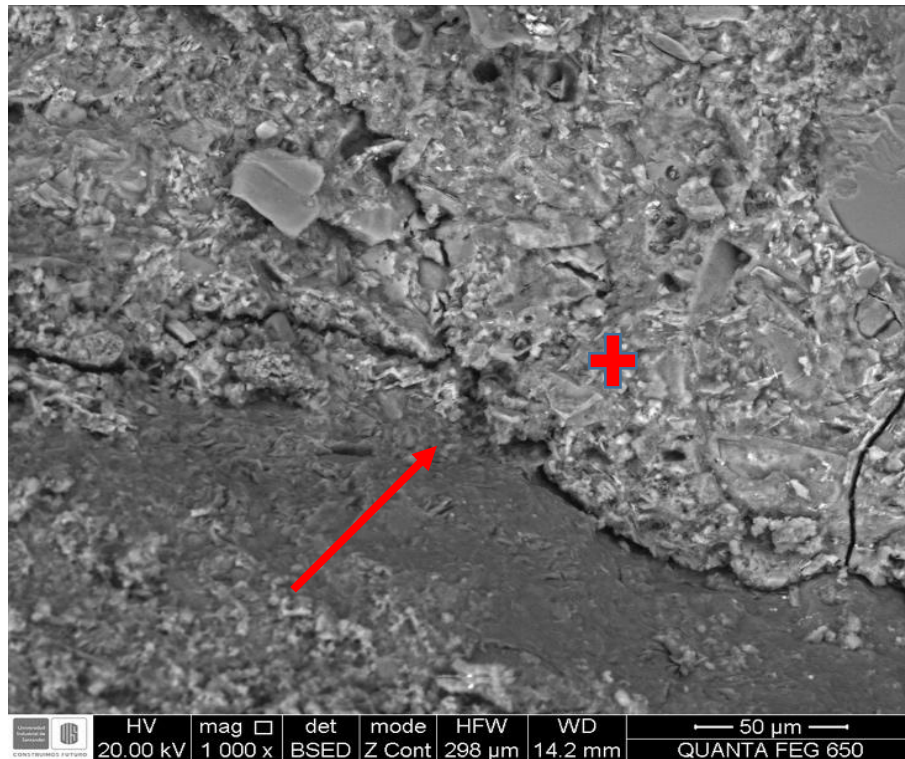
Imagen 23. Matriz cementicia de la mezcla optimizada P*.



Fuente: Laboratorio de Microscopía UIS.

Al realizar una magnificación mas elevada, en la imagen 24 se puede observar claramente la interfase o la zona de transición agregado-cemento donde se generan las fallas mecánicas en el concreto por el desprendimiento del agregado, en este caso son causadas por los ensayos de compresión uniaxial realizados a todas las muestra de concreto, la flecha roja indica la ruptura que hay entre el agregado y la pasta cementante afectando las propiedades mecánicas y evidenciando que los esfuerzos que podía soportar esta muestra ya fueron superados. Cabe resaltar que todas las muestras para el ensayo SEM fueron tomadas de los cilindros de concreto que se fundieron y fallaron durante toda la fase experimental que se realizó anteriormente.

Imagen 24. Falla mecánica en la mezcla optimizada P*.



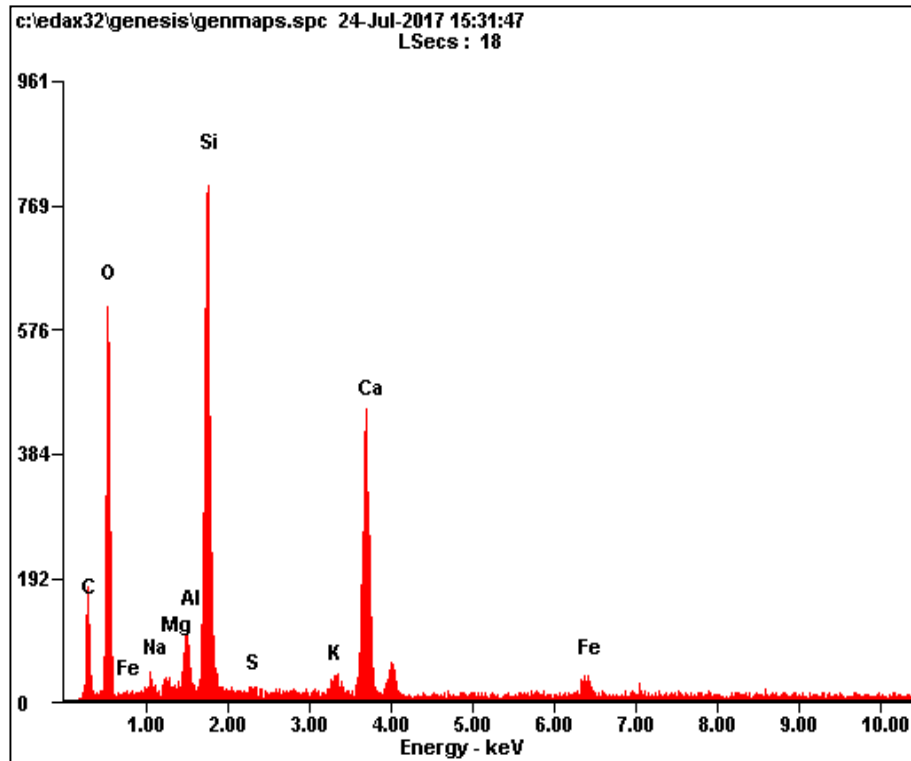
Fuente: Laboratorio de Microscopía UIS.

5.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X DRX

Mediante en ensayo DRX se puede determinar la composición química de las muestras estudiadas, el equipo utilizado para realizar la Microscopía de Barrido Electrónico también es utilizado para tal fin. Las muestras de concreto endurecido utilizadas en este ensayo fueron las mismas que se emplearon para el ensayo SEM.

5.2.1 Análisis DRX para la mezcla de concreto control (P0). Al realizar el ensayo de Difracción de Rayos X en la mezcla de control P0, en la Figura 22 se puede observar una composición química normal que corresponde a un concreto ordinario sin ningún tipo de adiciones; la cruz de color rojo indica el lugar del cual se toma la composición química y se observa que domina la presencia de Sílice, esto se debe a la reacción puzolánica normal del cemento.

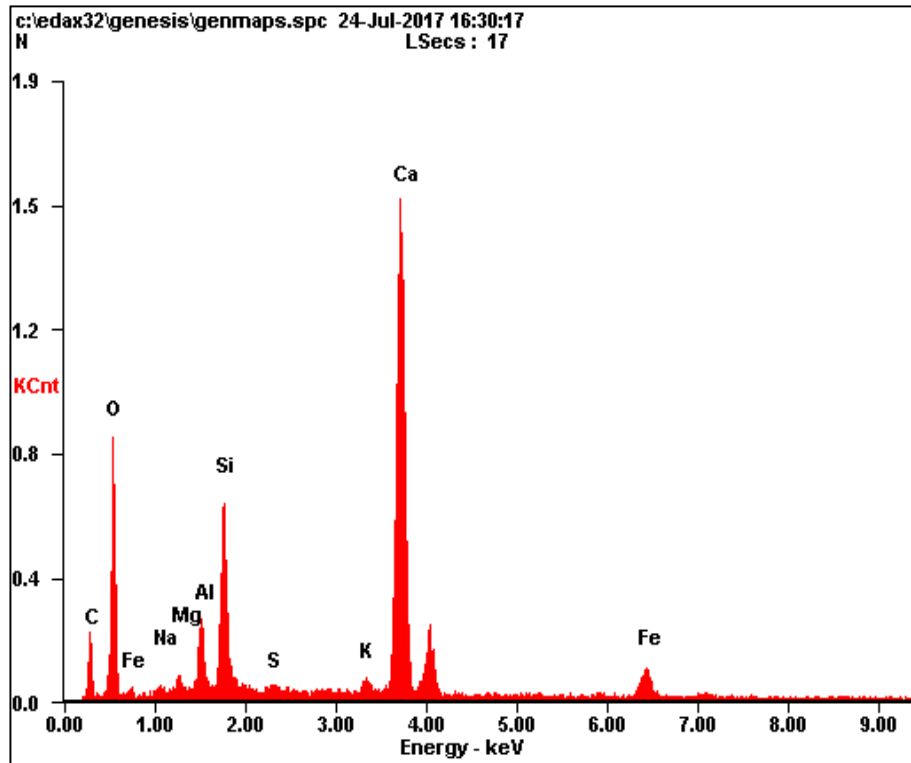
Figura 22. Composición química de la mezcla de control P0.



Fuente: Laboratorio de Microscopía UIS.

5.2.2 Análisis DRX para la mezcla de concreto optimizada (P*). Al realizar el ensayo de Difracción de Rayos X en la mezcla optimizada P*, en la Figura 23 se puede observar una composición química interesante ya que domina la presencia de Calcio en comparación con la mezcla control P0, esto se debe a que la reacción puzolánica de la escoria de alto horno es más lenta y se espera que para tiempos más grandes de maduración del concreto como 56 y 90 días la reacción se complete y pueda sobresalir la Sílice. Además aparecen otros elementos que son comunes en la composición química del concreto y que también pertenecen a la mezcla de control como lo son el Hierro, Aluminio, Magnesio, Potasio, entre otros.

Figura 23. Composición química de la mezcla de control P0.



Fuente: Laboratorio de Microscopía UIS.

6. CONCLUSIONES

- Según investigaciones anteriores se determinó la curvatura de los dos factores de entrada en cuanto a reemplazo de material cementante, sin embargo en la presente investigación en el análisis de varianza se puede observar que el factor cuadrático de nS no es un valor significativo en el modelo de la superficie de respuesta, con el fin de evaluar el comportamiento de este factor de entrada se recomienda mover los límites de reemplazo por encima del 1,5 respecto a nS esto con el fin de evaluar la curvatura en otra zona de la superficie de respuesta y detectar posibles cambios en el comportamiento lineal observado.
- A pesar no obtener una óptima general en cuanto a sustitución de material cementante, si se llega a encontrar un máximo local con un reemplazo de 13.82% de BF y 1.5 % de nS, visiblemente se observa que la mezcla optimizada tiene una menor resistencia a compresión uniaxial , sin embargo a través de un análisis estadístico de las medias poblacionales se observa que el comportamiento mecánico a nivel de resistencia a la compresión uniaxial para un tiempo de curado de 7 días entre la mezcla optimizada y la muestra de control es muy similar esto lleva a pensar que el reemplazo en edades tempranas no tiene un efecto significativo.
- Teniendo en cuenta el comportamiento de la mezcla optimizada a los 28 días, se observa una reducción significativa en la resistencia a compresión uniaxial, esto puede deberse a los efectos de la reacción puzolánica lenta del reemplazo de BF, podría esperarse que en tiempos de curado superiores como 56 y 90 días, la resistencia aportada por el reemplazo sea mayor.
- Una vez se determina el reemplazo óptimo local se observa un comportamiento favorable de la mezcla respecto a la resistencia a tensión indirecta a 28 días , sin embargo en términos estadísticos no dicho aumento no se considera

significativo, lo que deja a la muestra optima en un rango de resistencia a tensión indirecta cercano a un concreto convencional, lo que lleva a pensar que la el remplazo optimo se puede considerar una alternativa viable evaluado respecto a este parámetro.

- Estadísticamente hablando los valores de durabilidad evaluada por penetración a ion cloruro de la mezcla optimizada comparada con la muestra de control tiene valores cercanos, sin embargo los valores para una penetración moderada para un concreto durable se encuentran entre 3 [mS/m] y 20 [mS/m]; la penetración en las mezclas en estudio es superior a los estándares, lo que indica una baja durabilidad del concreto, esto implica la presencia de burbujas de aire interconectadas que permiten el paso de iones cloruro en el concreto reduciendo su durabilidad.
- Las características físicas en estado fresco de la mezcla optimizada fueron muy similares a la mezcla de control incluso se obtuvo una reducción en el contenido de aire indica una mejor compactación, además de esto se puede observar que la trabajabilidad de la mezcla no se vio afectada por el reemplazo de material cementante a tal punto que se pude considerar la reducción en el uso de aditivos.
- La mezcla optimizada de concreto gracias a la acción conjunta de la escoria de alto horno y las nano-partículas presenta una matriz cementicia más uniforme y pero las fallas mecánicas son más evidentes ya que el alto porcentaje de reemplazo de la escoria de alto horno produce estas pérdidas mecánicas desfavorables para el concreto y la acción de las nano-partículas se va desarrollando a medida que se madura el concreto, esto se evidencia en la composición química ya que predomina el calcio y eso se debe a que no se ha completado la reacción puzolánica y no explota en su totalidad el potencial de la adición de nano-partículas.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 211.1. Guide to Quality Management Auditing in the Concrete Industry. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM 1202. Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1760-2. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. 2012.

CROSSIN, E. The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute, *Journal of Cleaner Production*. 2015, vol.95, pp. 101–108.

ESTRUCPLAN. Impactos Ambientales y Actividades Productivas. Salud, seguridad y medio ambiente en la industria. [En línea]. Buenos Aires D.C., recuperada en 2 de mayo de 2003 Disponible en <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=258>.

GONG, Xiangzheng, *et al.* Environmental impact analysis of blast furnace slag applied to ordinary Portland cement production. *Journal of Cleaner Production* 2016 vol. 120, pp. 221–230.

HALIT, Yazici, et al. Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. 2018, Fuel 87(12), pp. 2401–2407.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 110. Ingeniería civil y arquitectura. Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico. Bogotá, D.C., 1991.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 118. Ingeniería civil y arquitectura. Cementos. Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat. Bogotá, D.C., 1998.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 121. Concretos. Especificación de desempeño para cemento hidráulico. Bogotá, D.C., 2014.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 127. Concretos. Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto. Bogotá, D.C., 2000.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 1299. Concretos. Aditivos químicos para concreto. Bogotá, D.C., 2008.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 1377. Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado e especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio. Bogotá, D.C., 2010.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 174. Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto . Bogotá, D.C., 2000.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 176. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso . Bogotá, D.C., 1995.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 1776. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados . Bogotá, D.C., 1994.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 1926. Ingeniería civil y arquitectura. Método para determinar la masa unitaria, rendimiento y contenido de aire por gravimetría del concreto. Bogotá, D.C., 1998.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 221. Ingeniería civil y arquitectura. Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. Bogotá, D.C., 2011.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 237. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. Bogotá, D.C., 1994.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 3512. Cementos. Cuartos de mezclado, cámaras y cuartos húmedos y tanques para el almacenamiento de agua, empleados en los ensayos de cementos hidráulicos y concretos. Bogotá, D.C., 2014.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 396. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. Bogotá, D.C., 1992.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 673. Concretos. Ensayo para la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Bogotá, D.C., 2010.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 722. Concretos. Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto. Bogotá, D.C., 1998.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 77. Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Bogotá, D.C., 2007.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 92. Ingeniería civil y arquitectura. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de los agregados . Bogotá, D.C., 1995.

JO, Byung-Wan.*et al.* Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles, Construction and Building Materials.2007. 21(6), pp. 1351–1355.

LAND G. y STEPHAN, D. The influence of nano-silica on the hydration of ordinary Portland cement, Journal of Materials Science. 2012. 47(2), pp. 1011–1017.

MINITAB INC. ¿Qué es una superficie de respuesta?.[En línea]. Manual de Soporte Técnico. Recuperado el 22 de agosto del 2017. Disponible en: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/response-surface-designs/what-is-a-response-surface-design/>

MINITAB INC. Diseño de Experimentos (DOE). [En línea]. Manual de Soporte Técnico. Recuperado el 22 de agosto del 2017.Disponible en: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/getting-started/designing-an-experiment/>

MUKHARJEE, Bhusan Bibhuti y BARAI, Sudhirkumar V. Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials. 2014, vol 55, pp. 29-37.

NAZARI, Ali y RIAHI, Shadi. Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO₂ nanoparticles, *Materials Science and Engineering*. 2010. A 527(29–30), pp. 7663–7672.

NAZARI, Ali y RIAHI, Shadi. The effects of SiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete, *Composites Part B: Engineering*. 2011. 42(3), pp. 570–578.

REZAIFAR, Omid. HASANZADEH, Mohsen, y GHOLHAKI, Majid. Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method, *Construction and Building Materials*. 2016, vol 123, pp. 59–68.

SÁNCHEZ ABRIL, Héctor Mauricio. Estado del arte sobre las escorias negras de horno de arco eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil. 2014. Universidad Santo Tomas Seccional Tunja, pp.1-14.

SCRIVENER, Karen y WRAY, Peter. (2012). Straight talk with Karen Scrivener on cement, CO₂ and sustainable development, *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 91, No. 5, pp. 47-50.

VEJMELKOVÁ, Eva. Et al. High performance concrete containing lower slag amount: A complex view of mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*. 2009. Fuel 23(6), pp. 2237- 2245.

ZAPATA ORDÚZ, Luis Eduardo. et al. Weibull statistical analysis of splitting tensile strength of concretes containing class F fly ash, micro/nano-SiO₂, *Ceramics International*. 2014. 40(5), pp. 7373–7388.