

COMPORTAMIENTO MECANICO DE SISTEMAS CEMENTANTES TERNARIOS (CEMENTO PORTLAND - CENIZA VOLANTE - ESCORIA DE ALTO HORNO)

Jhon Cárdenas Pulido^{1}, Juan Lizarazo-Marriaga², Willian Aperador Chaparro¹*

1: Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Carrera 11 No. 101-80 Bogotá, Colombia.

2: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, UNAL, Carrera 30 No. 45 Ed 406 Bogotá, Colombia.

* e-mail: u1100907@unimilitar.edu.co

**RESUMEN**

En este artículo se presentan los resultados de una investigación encaminada a evaluar el efecto de sistemas cementantes ternarios conformados por adiciones de ceniza volante y escoria de alto horno, sobre las propiedades mecánicas de compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson, tracción y módulo de rotura del concreto. El programa experimental comprendió el ensayo de 120 especímenes de concreto para 8 mezclas con diferentes dosificaciones de cemento Portland, ceniza volante y escoria de alto horno. La caracterización de las mezclas en estado endurecido se realizó mediante análisis de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB). Los resultados obtenidos indican que los concretos adicionados presentan las mejores propiedades mecánicas para contenidos simultáneos de cenizas volantes y escorias de alto horno equivalentes al 10%, y que las propiedades mecánicas de las mezclas ternarias dependen fundamentalmente del desempeño mecánico de las mezclas binarias. Además, se observó que para las mezclas ternarias, la ceniza volante y la escoria de alto horno no presentan interacción mútua, sino más bien estos materiales coexisten en la matriz y aportan de forma independiente resistencias al concreto, producto de su reacción con el cemento Portland.

Palabras claves: Concretos adicionados, mezclas ternarias, propiedades mecánicas.

MECHANICAL PERFORMANCE OF BLENDED TERNARY CEMENTITIOUS SYSTEMS
(PORTLAND CEMENT–FLY ASH–BLAST FURNACE SLAG)**ABSTRACT**

In this paper are summarized the results of a research aimed to study the effect of ternary cementitious systems on the mechanical properties of concrete in compression, modulus of elasticity, Poisson's ratio and modulus of rupture. The experimental program included the test of 120 concrete specimens from 8 mixtures having different dosages of Portland cement, fly ash and blast furnace slag. The characterization of the blends in hardened state was performed by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) analysis. The results indicate that blended concretes have the best mechanical properties for same contents of fly ash and blast furnace slag equivalents to 10%. Also, the mechanical properties of ternary blends mainly depend on the mechanical properties of binary blends. Futhermore it was observed that for ternary blends, fly ash and blast furnace slag did not show any interaction between their mechanical properties. It is believed that these materials coexist together in the matrix and provide to the concrete an increase in the strength due to the independent reaction of each with the Portland cement.

Keywords: Blended concretes, ternary blend mixtures, mechanical properties.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, el empleo de adiciones minerales en el concreto representa una práctica común en la industria de la construcción y las obras civiles. Este hecho obedece a las oportunas medidas que se han adoptado para reducir los efectos de gases tóxicos emitidos a la atmósfera por causa de la fabricación del cemento Portland. La producción de concreto, segundo material más usado a escala mundial después del agua, es de aproximadamente 11.5 billones de toneladas cada año, con un consumo de 1.5 billones de toneladas de cemento, 9 billones de toneladas de agregados y 1 billón de toneladas de agua [1]. Asimismo, se afirma que para el proceso de manufactura de una tonelada de cemento Portland ordinario se libera alrededor de una tonelada de CO_2 a la atmósfera. Por lo tanto, la inclusión de adiciones minerales en las mezclas de concreto parece ser una opción adecuada para mitigar esa liberación de gases contaminantes que deterioran el entorno y la calidad de vida de sus habitantes. Las adiciones minerales se caracterizan por ser materiales puzolánicos, subproductos de los procesos industriales, que por sí solos carecen de propiedades cementantes pero que en condiciones apropiadas aportan endurecimiento y durabilidad al concreto. Ejemplo de ello son las cenizas volantes y las escorias siderúrgicas o de alto horno. De acuerdo con Wang y Lee [2], las cenizas volantes y escorias presentan diferentes composiciones químicas, tales como la fase vítrea, los contenidos de SiO_2 y CaO y en general diferente estequiometría en las reacciones de hidratación. Además, su velocidad de hidratación dependerá de la reactividad y de la cantidad de hidróxido de calcio presente en las mezclas hidratadas [3].

La incorporación de escoria de alto horno o ceniza volante en el concreto, de forma independiente, puede generar algunas ventajas técnicas en el compuesto, tanto en su estado fresco como en el endurecido. Sin embargo, la combinación de estos materiales en mezclas ternarias y sus efectos sobre las prestaciones mecánicas del concreto no han sido completamente determinados. Sengul y Tasdemir [4], afirman que por el uso de diferentes puzolanas juntas, algunas de las deficiencias pueden ser compensadas y se pueden obtener concretos más amigables con el medio ambiente. Li et al. [5] comprobaron que se mejoraban las resistencias a compresión y flexión del concreto cuando la ceniza

volante se adicionaba en una proporción adecuada a la escoria a lo cual denominaron un efecto de complemento mutuo y superioridad. Las mezclas ternarias de cemento Portland, escoria de alto horno y ceniza volante suelen ser desarrolladas para concreto masivo con el propósito de evitar el desarrollo de fisuras térmicas debido al calor de hidratación del cemento [6]. De hecho, un óptimo desempeño del concreto con características de resistencia, estabilidad dimensional, impermeabilidad y alta trabajabilidad puede ser logrado por mezclas de composición ternaria [7]. Referente a los aspectos durables, Li y Zhao [8] afirman que las mezclas ternarias con cemento Portland, ceniza volante y escoria presentan un excelente comportamiento a corto y largo plazo en resistencias a compresión y resistencias a ataque de sulfatos (H_2SO_4), y esta combinación mejora la microestructura y el grado de hidratación. De este modo, cuando las adiciones minerales de cenizas volantes y escorias son usadas juntas, mejores resultados pueden ser siempre logrados [9].

El objeto del presente trabajo consiste en evaluar la influencia de sistemas cementantes ternarios sobre el desempeño mecánico del concreto. Para tales efectos se confeccionaron especímenes de concreto con diferentes dosificaciones de ceniza volante y escoria de alto horno combinados con el cemento Portland. Los resultados experimentales fueron utilizados para formular ecuaciones de predicción que describen el comportamiento de los concretos adicionados en función del porcentaje de adiciones utilizado. Así, un mejor entendimiento sobre el comportamiento de los concretos adicionados fomentará una construcción más sana y sostenible con el medio ambiente sin disminución alguna en las propiedades de resistencia y vida útil, además de una disminución en costos de fabricación por la utilización y aprovechamiento de algunos subproductos industriales.

2. PARTE EXPERIMENTAL

El programa experimental incluyó la manufactura de 8 mezclas de concreto constituidas por 4 mezclas de composición ternaria y 4 mezclas de control con una composición binaria, para diferentes dosificaciones de cemento Portland, ceniza volante y escoria de alto horno. Los ensayos se realizaron sobre 120 especímenes conformados por 96 especímenes cilíndricos y 24 especímenes en forma de vigas, para las diferentes mezclas elaboradas.

2.1 Materiales

En este estudio se utilizó cemento Portland comercial Tipo I, ceniza volante clase F proveniente de la planta termoeléctrica de Sochagota (Colombia) y escoria granulada de alto horno proveniente de la planta de Acerías Paz del Río (Colombia). La caracterización de estos materiales se realizó mediante ensayos de fluorescencia de rayos X, su composición química se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de los materiales cementantes empleados.

Compuesto	Cemento Portland, %	Ceniza volante, %	Escoria de alto horno, %
SiO ₂	18,15	54,30	33,70
Al ₂ O ₃	4,65	20,8	12,80
Fe ₂ O ₃	3,80	5,30	0,48
CaO	60,03	6,40	45,40
MgO	2,50	0,80	1,00
Na ₂ O	0,80	0,90	0,12
K ₂ O	0,50	0,70	1,50
P ₂ O ₅	-	0,70	-
TiO ₂	-	1,20	0,50
MnO	-	0,01	-
SO ₃	2,40	0,92	-
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,90	2,61	2,63
Inquemados	0,6	8	-

Como material pétreo se empleó agregado fino tipo arena de río con módulo de finura de 3,04 y absorción de 0,81%. Como agregado grueso se utilizó una grava fina de color gris con Tamaño Máximo Nominal (TMN) de 12 mm.

2.2 Mezclas de concreto

Todas las mezclas se diseñaron para un contenido de material cementante de aproximadamente 395 kg/m³ y una relación agua/cemento fija de 0,5. Para tales efectos, se prepararon 4 mezclas de composición ternaria variable con cemento Portland y reemplazos parciales de ceniza volante y escoria de alto horno, y 4 mezclas de control con una composición binaria entre cemento Portland - ceniza volante y cemento escoria de alto horno, de forma independiente. Las proporciones de las mezclas se resumen en la Tabla 2. Las abreviaciones PC, FA y BFS se utilizaron para identificar a los materiales cemento Portland, ceniza volante y escoria de alto horno, respectivamente, por sus siglas en inglés. También fueron introducidos a la nomenclatura los

porcentajes de reemplazo del material cementante principal: por ejemplo, PC8-FA2 representa la mezcla de 80% cemento Portland y 20% ceniza volante; PC8-FA1-BFS1 representa la mezcla de 80% cemento Portland, 10% ceniza volante y 10% escoria de alto horno; PC4-FA2-BFS4 representa la mezcla de 40% cemento Portland, 20% ceniza volante y 40% escoria de alto horno. El diseño se realizó para 1 m³, por lo que para las diferentes mezclas los contenidos de cada material variaron entre sí teniendo en cuenta las diferencias en densidad entre el cemento Portland y las adiciones.

2.3 Descripción del equipo y la instrumentación

Se llevaron a cabo ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas del concreto con reemplazos parciales y totales del cemento Portland. Estos ensayos se realizaron con el objeto de determinar el efecto de las adiciones de ceniza volante y escoria sobre las propiedades del concreto, es decir, modificación de su resistencia y desempeño. La descripción y cantidad de los ensayos se muestra en la Tabla 3.

2.3.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión se determinó a partir de los especímenes en forma de cilindros con dimensiones de 15x30 cm, a edades de 28 y 90 días, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM-C-39 (2015) [10]. La carga se aplicó utilizando una prensa hidráulica controlada por un sistema automatizado y la velocidad de aplicación de carga fue de 0,25 MPa/s. Para una adecuada aplicación de la carga sin excentricidades, se contempló la utilización de discos metálicos y de neopreno. La configuración del ensayo y la falla característica de un espécimen se muestran en la Figura 1.

2.3.2 Módulo de elasticidad y relación de Poisson

El módulo de elasticidad secante o módulo de Young y la relación de Poisson fueron determinados a partir de los especímenes cilíndricos con dimensiones de 15x30 cm con el procedimiento de la norma ASTM-C-469 (2014) [11]. La configuración del ensayo se muestra en la Figura 2. En los ensayos se utilizó un dispositivo compresómetro-extensómetro que está constituido por tres anillos articulados por pivotes para mantener las distancias entre cada anillo. Dos transductores de desplazamiento se encuentran acoplados al dispositivo y están encargados de

registrar los cambios en la longitud (desplazamiento longitudinal) y el diámetro (desplazamiento transversal) del espécimen cuando es sometido a esfuerzos de compresión mediante una fuerza axial. La carga fue aplicada por una prensa hidráulica

controlada por un sistema automatizado, y fue aplicada a una velocidad de 0,25 MPa/s. Para determinar el módulo de elasticidad y relación de Poisson, se aplicó una carga equivalente al 50% de la resistencia máxima en compresión.

Tabla 2. Proporciones de las mezclas de concreto.

Identificación	PC (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	BFS (kg/m ³)	Agregado grueso (kg/m ³)	Agregado fino (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Silicato de sodio (kg/m ³)	Plastificante (kg/m ³)
PC8-FA2	316,3	79,1	-	880,1	732,9	197,7	19,8	-
PC8-BFS2	318,9	-	79,7	887,5	739,1	199,3	19,9	-
PC6-FA4	234,8	156,5	-	871,1	725,3	195,6	19,6	-
PC6-BFS4	238,6	-	159,1	885,2	737,1	198,8	19,9	-
PC8-FA1-BFS1	317,5	39,7	39,7	883,5	735,6	198,4	19,8	4,0
PC6-FA2-BFS2	236,8	78,9	78,9	878,4	731,4	197,3	19,7	4,0
PC4-FA2-BFS4	157,5	78,8	157,5	876,7	730,3	196,9	19,9	4,0
PC4-FA4-BFS2	156,3	156,3	78,2	870,1	724,5	195,4	19,5	3,9

Tabla 3. Descripción y cantidad de ensayos mecánicos.

Identificación	Resistencia a compresión, <i>f_c</i>		Módulo de elasticidad, <i>E_c</i> , y relación de Poisson, <i>v</i>	Resistencia a tracción, <i>f_t</i>	Módulo de rotura, <i>f_r</i>	Subtotal	Total especímenes
	28 días	90 días					
PC8-FA2	3	3	3	3	3	15	
PC8-BFS2	3	3	3	3	3	15	
PC6-FA4	3	3	3	3	3	15	
PC6-BFS4	3	3	3	3	3	15	
PC8-FA1-BFS1	3	3	3	3	3	15	120
PC6-FA2-BFS2	3	3	3	3	3	15	
PC4-FA2-BFS4	3	3	3	3	3	15	
PC4-FA4-BFS2	3	3	3	3	3	15	



Figura 1. Configuración del ensayo de resistencia a compresión.

2.3.3 Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción se determinó mediante el método de tensión indirecta de especímenes con dimensiones de 15x30 cm en forma de cilindros, y se siguieron las recomendaciones de la norma ASTM-C-496 (2011) [13]. La carga fue aplicada por una prensa hidráulica controlada por un sistema automatizado hasta la falla, y la velocidad de aplicación de la carga fue de 1290 N/s. La configuración del ensayo se muestra en la Figura 3.

2.3.4 Módulo de rotura

Los especímenes en forma de vigas con dimensiones de 15x15x60 cm fueron ensayados a flexión siguiendo el procedimiento de la norma ASTM-C-78 (2015) [14]. La aplicación de la carga se efectuó mediante la utilización de un marco de carga servo-

controlado con capacidad máxima 100 kN. La velocidad de aplicación de carga fue de 130 N/s y consistió en la aplicación de dos cargas puntuales continuas y sin impactos sobre el tercio central o tercio medio del espécimen. La configuración del ensayo se muestra en la Figura 4.

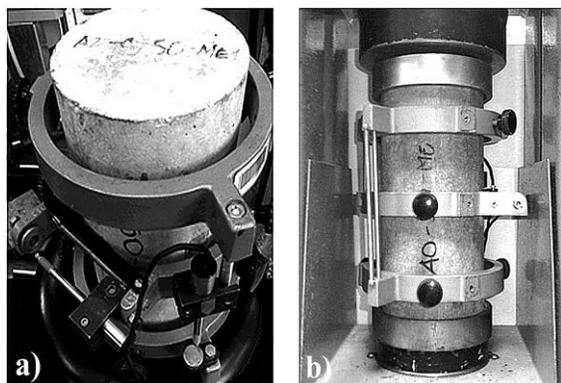


Figura 2. Configuración del ensayo de módulo de elasticidad y relación de Poisson: a) transductores de desplazamiento, b) dispositivo compresómetro-extensómetro. Cárdenas *et al.* [12].

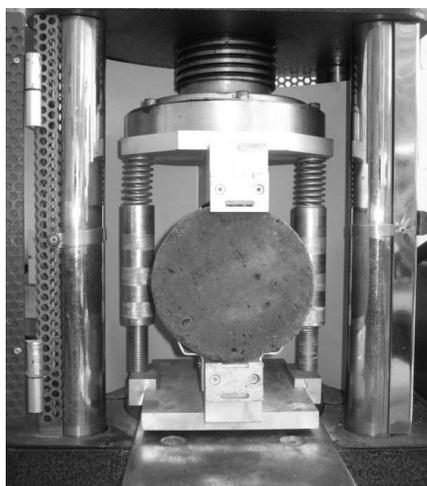


Figura 3. Configuración del ensayo de resistencia a tracción.

2.3.5 Difracción de rayos X y Microscopía electrónica de barrido

Las mezclas ternarias fueron caracterizadas mediante un difractómetro de rayos X (DRX). El arreglo experimental corresponde a Goniómetro PW3050/60 (θ/θ), manejado bajo un sistema XPERT-PRO usando una radiación monocromática de $\text{Cu K}\alpha$ 1,54 Å, operado a 40 kV y 40 mA bajo condiciones de temperatura de 25°C. El barrido

sobre la superficie fue realizado desde $2\theta = 20,01^\circ$ hasta $2\theta = 65^\circ$ con un paso $2\theta = 0,02^\circ$ a un tiempo de barrido de 1 segundo, utilizando la base de datos de difracción del equipo, además se empleó el programa MAUD el cual es un programa de análisis que se basa en el método Rietveld, este método consiste en ajustar un diagrama teórico para que coincida en su totalidad con el observado. El análisis microestructural se realizó, mediante la técnica de imágenes composicionales por electrones retrodispersados en microscopía electrónica de barrido (MEB) y las fases presentes se determinaron mediante espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDX).



Figura 4. Configuración del ensayo de módulo de rotura.

Para evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos en la experimentación, se utilizaron parámetros estadísticos tales como la media aritmética (\bar{X}) y el coeficiente de variación (CV), los cuales determinan el promedio y la dispersión de los resultados medidos, respectivamente. Adicionalmente se utilizó el coeficiente de correlación (r) el cual permitió medir el grado de intensidad de relación entre los valores medidos y los calculados mediante los modelos propuestos en este estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de los ensayos obtenidos para los especímenes de concreto adicionados. A partir de los resultados, se analizaron las tendencias correspondientes y se formularon varios modelos de predicción de cada parámetro mecánico evaluado en función del porcentaje de ceniza volante y de escoria de alto horno utilizados.

3.1 Caracterización morfológica de las mezclas

3.1.1 Microscopia electrónica de barrido

En esta sección se presentan exclusivamente los resultados de la caracterización físico-química para la mezcla 40% cemento Portland, 40% ceniza volante y 20% escoria de alto horno (PC4-FA4-BFS2), pues esta mezcla resultó ser la más representativa de las 4 mezclas ternarias evaluadas en términos de su morfología. Es decir, los resultados de microscopía electrónica de barrido de la mezcla PC4-FA4-BFS2 resultaron muy similares a los encontrados en las demás mezclas ternarias, esto es, PC8-FA1-BFS1, PC6-FA2-BFS2 y PC4-FA2-BFS4.

En la Figura 5, se muestra la formación de partículas esféricas para la mezcla ternaria PC4-FA4-BFS2. Esta formación se debe a la influencia de una serie de complejos cambios fisicoquímicos que ocurren en las partículas, el más notable es la rápida conversión a formas esféricas como resultado de las fuerzas de tensión superficial actuando durante la fusión para minimizar la energía libre superficial. Además de la determinación de parámetros físicos, en la Figura 5 se muestra la caracterización química de la mezcla PC4-FA4-BFS2. La composición química de la mezcla PC4-FA4-BFS2 (Figura 5) se deriva de la influencia del contenido de elementos predominantes que indica el potencial de aplicabilidad de las cenizas volantes y escoria siderúrgica sobre el posible impacto ambiental de la aplicación del producto obtenido en una mezcla cementante.

3.1.2 Difracción de rayos X

En la Figura 6 se observa la abundancia de fases vítreas en la mezclas ternarias hidratadas a causa de los altos porcentajes de ceniza volante y escoria siderúrgica presentes. Estas fases vítreas son generadas por el enfriamiento rápido de los materiales en el proceso de obtención. Por ejemplo, durante la generación termoeléctrica de las cenizas volantes, las partículas de carbón salen de los quemadores arrastradas por la corriente de gases y pasan rápidamente a un régimen de temperaturas más bajas donde son enfriadas a un estado sólido vítreo. La velocidad de enfriamiento depende del tamaño de la partícula: las partículas grandes enfrían más lentamente permitiendo la cristalización en su interior. Además, algunas de las partículas infladas explotan y forman pequeñas gotas fundidas. Otras

partículas son enfriadas de la misma forma que las partículas sólidas cuando abandonan definitivamente la llama y se mantienen como esferas huecas con variaciones en el espesor de las paredes. Además, una consecuencia de la presencia de gases (O_2 , CO_2 , SO_2 y H_2O) es su posible actuación en las reacciones secundarias con el vidrio que conllevan a la polimerización o despolimerización de las unidades de sílice de las partículas de ceniza.

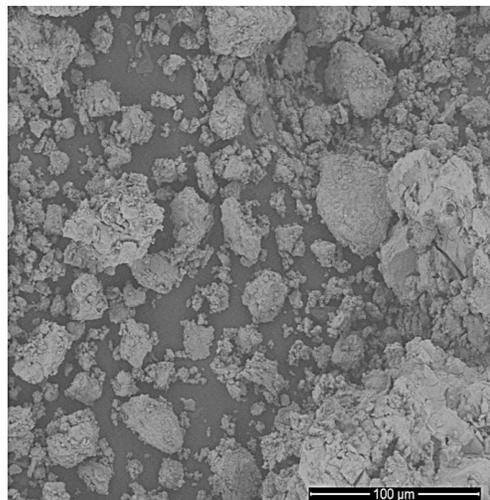


Figura 5. Micrografía de la mezcla PC4-FA4-BFS2 en estado hidratado.

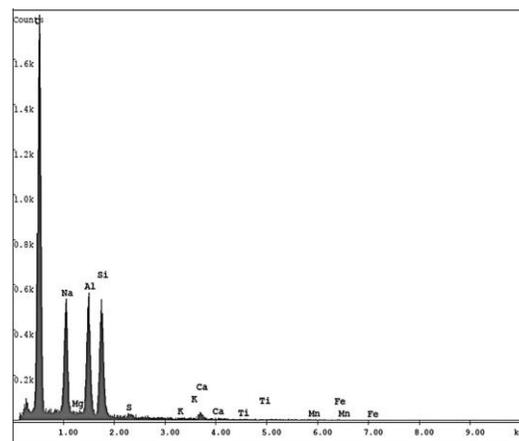


Figura 6. Espectro de radiación X emitido por la mezcla PC4-FA4-BFS2 en estado hidratado, en donde se observa el microanálisis químico semicuantitativo y se encuentran componentes de hierro, potasio, azufre, aluminio, silicio, sodio, magnesio, manganeso, entre otros constituyentes básicos de la ceniza volante y la escoria de alto horno.

El espectro de difracción de rayos X mostrado en la Figura 7 para las mezclas ternarias evaluadas permite la identificación de las fases vítreas, llevada

a cabo a partir de las densidades de distribución interatómicas. En el espectro se determina que el sistema está compuesto por un gran porcentaje por Tridimita, también conocida como óxido de silicio (SiO_2) estabilizado con un metal alcalino [15,16]; correspondiente a un mineral inorgánico con un sistema cristalino monoclinico, con un número de PDF - 18-1170 (PDF : Powder Difraccion File). La Tridimita se obtiene debido al proceso de sintetizado porque no hay una forma natural para su formación, para lo cual se requiere una temperatura de síntesis de $1.100\text{ }^\circ\text{C}$. El otro compuesto corresponde a Mayenita el cual está mezclado con cristales de óxido de calcio y óxido de aluminio (12/7), su fórmula química es $\text{Al}_{14}\text{Ca}_{12}\text{O}_{33}$ (PDF - 01-070-2144) y tiene un sistema cristalino cúbico. El compuesto de tipo Mayenita es un sistema en el que una parte o la totalidad de los iones de oxígeno libre en las celdas se sustituyen por otros aniones dentro del intervalo en el que se mantienen, en un cristal de Ca y una estructura de celda formada por el compuesto de tipo AlO: el oxígeno en las celdas se sustituye por electrones por medio del tratamiento y forman un compuesto de tipo Mayenita conductora [17]. Otro mineral con un porcentaje mínimo en la mezcla es la Srebrodolskita con un PDF- 01-074-0802 [18], su fórmula química es $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ y corresponde a un sistema cristalino tipo ortorrómbico. El Srebrodolskita es un compuesto estable y su formación se debe a altas temperaturas. Otro compuesto similar al anterior presente en la mezclas ternarias es la Brownmillerita (óxido tetracálcico y dialuminio) (PDF - 01-074-0803), que tiene los componentes $\text{Al}_2\text{Ca}_4\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ y posee también una estructura ortorrómbica [19]. La Brownmillerita es uno de los componentes responsables de las propiedades hidráulicas que tienen las mezclas ternarias elaboradas en el presente trabajo. Adicionalmente la Brownmillerita es un compuesto hallado en cementos tradicionales como el Portland tipo I: la Brownmillerita es estable a temperaturas de $1200\text{ }^\circ\text{C}$, por lo tanto su producto de transformación presenta una composición de fase similar a la del Clinker [20]. También fueron observados los compuestos de óxido de magnesio y dialuminio (PDF - 01-073-2210), los cuales poseen una estructura cúbica y fueron identificados en algunos de los minerales principales de las escorias siderúrgicas de alto horno como el magnesio. Otro compuesto presente es el carbonato de calcio y magnesio (Dolomita) PDF - 36-426 [21] conocida

como piedra caliza, la cual tiene una fórmula química correspondiente a $\text{C}_2\text{Ca}_1\text{Mg}_1\text{O}_6$. La Dolomita posee una estructura cristalina hexagonal, y está constituida esencialmente por aluminosilicatos hidratados que proporcionan características alcalinas. También, los óxidos de magnesio presentes en el sistema forman silicatos de magnesio estables, siendo estos responsables de las propiedades mecánicas de las mezclas en estado endurecido. El otro compuesto identificado fue el silicato de aluminio (PDF- 01-074-4146), también denominado Mullita, con la fórmula química $\text{Al}_{4.68}\text{O}_{9.66}\text{Si}_{1.32}$, el cual posee una estructura cristalina ortorrómbica. La Mullita se forma debido a que la sílice se encuentra en equilibrio con alúmina y óxidos de calcio o hierro dando lugar a su cristalización, la cual corresponde a una fase vítrea aluminosilicatada: por lo tanto la Mullita tiene un especial interés para la obtención de materiales cementicios. Finalmente, el otro compuesto observado fue el cuarzo (PDF - 98-010-7202) correspondiente a la fase inorgánica presente en cada una de las mezclas ternarias.

3.2 Caracterización mecánica de las mezclas

3.2.1 Resistencia a compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, f_c , para las mezclas ternarias a edades de 28 días y 90 días se muestran en la Tabla 4. De igual forma, los resultados en compresión para las mezclas binarias a edades de 28 y 90 días se muestran en la Tabla 4, y son mediciones de referencia adaptadas del trabajo de Cárdenas *et al.* [12]. Las tendencias obtenidas en resistencia a compresión de las mezclas ternarias se muestran en las Figuras 7 y 8.

Como se observa en la Tabla 4 y en las Figuras 8 y 9, se obtuvieron los valores más altos de resistencia a compresión cuando los contenidos de ceniza volante y escoria de alto horno fueron equivalentes al 10%. Para la edad inicial evaluada a 28 días, se obtuvo que la mezcla PC8-FA1-BFS1 exhibió resistencias a compresión 20% mayores que la mezcla PC8-FA2-BFS2. A mayor contenido de adiciones al cemento se produce un menor desempeño mecánico del concreto en edades tempranas. También se obtuvo que la mezcla ternaria con mayor contenido de ceniza volante (PC4-FA4-BFS2), presentó resistencias a compresión 14% mayores con respecto a la mezcla

ternaria con el mayor contenido de escoria siderúrgica, correspondiente a la PC4-FA2-BFS4. Lo anterior puede ser atribuido a que en edades tempranas, los mayores contenidos de ceniza sin reaccionar actuaron como relleno en las porosidades de la matriz.

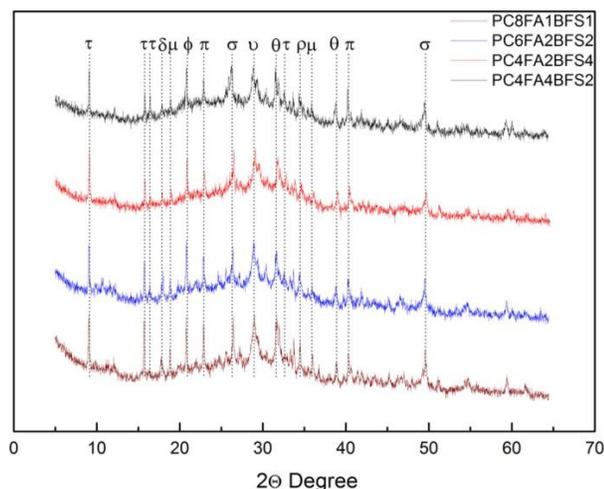


Figura 7. Difractometro de rayos X de las mezclas ternarias τ : Tridymite; δ : Braunmillerie; μ : Mayenite; ϕ : Dolomite; π : Mullite; σ : Quartz; υ : Pyrolusite; θ : Dialuminium; ρ : Srebrodolskite.

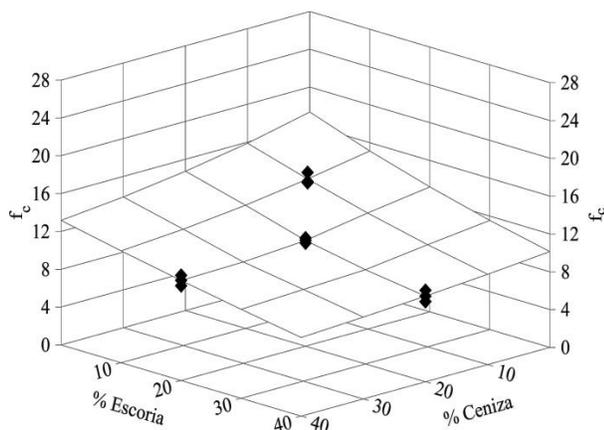


Figura 8. Tendencias obtenidas en compresión a 28 días.

Para la edad final evaluada a 90 días, se observó que la mezcla PC8-FA1-BFS1 exhibió resistencias a compresión 6% mayores a la mezcla PC8-FA2-BFS2, y en comparación con los resultados a 28 días, se evidencia el desarrollo de resistencias por la combinación de las adiciones minerales de ceniza y escoria en altos contenidos. Además, como se observa en la Tabla 4, la resistencia a compresión

25.14 MPa correspondiente a la mezcla PC8-FA1-BFS1, estuvo comprendida entre los valores 23.13 MPa y 27.77 MPa de las mezclas binarias PC8-FA2 y PC8-BFS2, respectivamente; y la resistencia a compresión 23.59 MPa de la mezcla PC6-FA2-BFS2 estuvo comprendida entre los valores 20.30 MPa y 26.77 MPa de las mezclas binarias PC6-FA4 y PC6-BFS4, respectivamente. En consecuencia, es posible afirmar que la resistencia a compresión de mezclas ternarias depende fundamentalmente del aporte de las mezclas binarias de forma separada: en este estudio, las resistencias a compresión de las mezclas ternarias resultaron ser aproximadamente el promedio en compresión de las mezclas binarias.

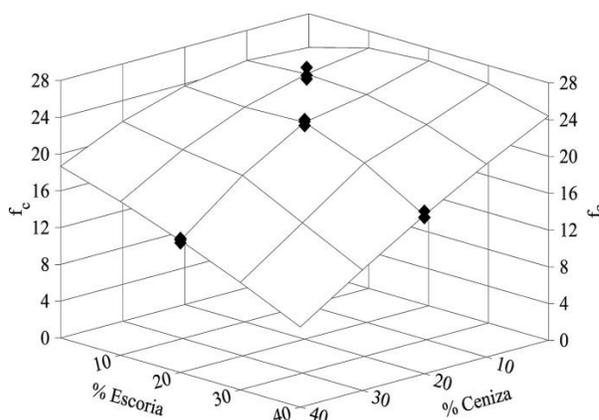


Figura 9. Tendencias obtenidas en compresión a 90 días.

La mezcla ternaria con mayor contenido de ceniza volante (PC4-FA4-BFS2), presentó resistencias a compresión 16% menores a la mezcla ternaria en contraste con la mezcla con el contenido más alto de escoria (PC4-FA2-BFS4). Esto se debe a que aún cuando la reacción puzolánica de la ceniza es lenta, la escoria logra hidratarse más rápidamente con el tiempo y aporta mayores resistencias a compresión del concreto. Lawrence *et al.* [22] indicó que la adición de ceniza volante puede retardar la hidratación del cemento, lo cual puede ser atribuido a los iones aluminatos o a la materia orgánica disuelta de la ceniza volante en la fase acuosa. También, Li *et al.* [5] afirman que durante el escenario posterior de las mezclas ternarias con adiciones de ceniza volante y escoria, el grado de hidratación de la ceniza es bajo pero la escoria produce buenos efectos en el desarrollo de resistencias, lo cual es acorde a los resultados del presente estudio. Sin embargo, la hidratación de las

adiciones minerales resulta más compleja que la sola hidratación del cemento. Por ejemplo, Wang y Lee [2] afirman que la ceniza volante conformada por fases de aluminio y sílice, en sí misma posee ninguna o algunas propiedades cementantes, pero que en una forma finamente dividida y en presencia de humedad químicamente reacciona con el hidróxido de calcio del cemento que lo consume para formar compuestos con propiedades cementantes. Asimismo, Fraay *et al.* [23] manifiestan que la reacción puzolánica de la ceniza volante en el concreto depende del rompimiento y disolución de la fase vítrea cuando el pH de la solución de poros es mayor a 13: esto significa que solo con el tiempo la ceniza volante podrá reaccionar bajo condiciones de alcalinidad

apropiadas. En cuanto a la hidratación de la escoria, Sengul y Tasdemir [4] afirman que el pH del agua de poros cercano a 12 es suficiente para la disolución y reacción de la escoria, y este nivel de alcalinidad ocurre en un corto periodo después de mezclar el cemento, la escoria y el agua; por tanto esta ágil reacción es uno de los factores que causan grandes resistencias tempranas de los concretos con escoria. En el presente trabajo, la adición de escoria promovió las mayores resistencias a compresión a edad de 90 días para todas las mezclas fabricadas, en comparación con la ceniza volante, lo cual puede ser atribuido a la naturaleza hidráulica de la escoria y la lenta reacción puzolánica de la ceniza.

Tabla 4. Resultados de resistencia a compresión a 28 y 90 días para cada tipo de mezcla.

Identificación	f_c 28 días, MPa					f_c 90 días, MPa				
	Esp 1	Esp 2	Esp 3	X	CV%	Esp 1	Esp 2	Esp 3	X	CV%
PC8-FA2	14,45	15,08	13,92	14,50	3,3	23,19	24,80	21,46	23,13	1,8
PC8-BFS2	17,11	16,99	17,32	17,16	0,8	27,83	28,76	27,57	27,77	5,9
PC6-FA4	9,48	9,85	9,21	9,53	0,3	20,59	21,25	20,59	20,30	5,9
PC6-BFS4	13,61	13,82	13,29	13,72	0,2	26,81	26,05	26,89	26,77	1,4
PC8-FA1-BFS1	13,70	13,58	14,66	13,98	3,5	24,98	24,60	25,84	25,14	2,1
PC6-FA2-BFS2	11,20	10,89	11,43	11,17	2,0	23,64	23,88	23,23	23,59	1,1
PC4-FA2-BFS4	9,05	9,67	8,48	9,07	5,4	17,02	17,69	16,99	17,23	1,9
PC4-FA4-BFS2	11,13	10,02	10,60	10,58	4,3	14,10	14,43	14,59	14,47	1,4

En relación al desarrollo de resistencias a compresión de 28 a 90 días de edad, como se observa en la Tabla 4 y las Figuras 8 y 9, las mezclas ternarias PC8-FA1-BFS1, PC6-FA2-BFS2, PC4-FA2-BFS4 y PC4-FA4-BFS2 exhibieron incrementos de 44%, 53%, 47% y 27%, respectivamente. Con base en estos resultados, se aprecian mayores incrementos de resistencia con mayores contenidos de escoria e incrementos menores cuando el contenido de ceniza volante predomina en la matriz.

3.2.2 Módulo de elasticidad y relación de Poisson

Los resultados de los ensayos de módulo de elasticidad, E_c , y relación de Poisson, ν , para las mezclas ternarias a edad de 90 días se muestran en la Tabla 5. De igual forma los resultados de módulo

de elasticidad y relación de Poisson para las mezclas binarias se muestran en la Tabla 5, y son mediciones de referencia adaptadas del trabajo de Cárdenas *et al.* [12]. Las tendencias obtenidas en módulo de elasticidad y relación de Poisson para las mezclas ternarias se muestran en las Figuras 10 y 11, respectivamente.

3.2.2.1 Módulo de elasticidad

Como se observa en la Figura 10, la mezcla PC8-FA1-BFS1 presentó valores de módulo de elasticidad 9% en incremento con referencia a la mezcla PC6-FA2-BFS2; y la mezcla ternaria con mayor contenido de ceniza volante, esto es PC4-FA4-BFS2, presentó módulos de elasticidad 2% más que la mezcla ternaria con el valor más alto de

Tabla 5. Resultados de módulo de elasticidad y relación de Poisson para cada tipo de mezcla.

Identificación	Módulo de elasticidad, E, MPa					Relación de Poisson, ν				
	Esp 1	Esp 2	Esp 3	X	CV%	Esp 1	Esp 2	Esp 3	X	CV%
PC8-FA2	22938	23120	22678	22912	0,8	0,141	0,139	0,138	0,139	0,8
PC8-BFS2	23338	23579	23128	23348	0,8	0,154	0,157	0,152	0,154	1,2
PC6-FA4	21906	21698	21789	21798	0,4	0,122	0,120	0,123	0,122	0,8
PC6-BFS4	20402	20689	20007	20366	1,4	0,150	0,152	0,149	0,150	0,7
PC8-FA1-BFS1	22951	23155	23135	23080	0,4	0,136	0,149	0,138	0,141	4,1
PC6-FA2-BFS2	20846	21133	20810	20930	0,7	0,129	0,138	0,131	0,133	2,9
PC4-FA2-BFS4	18010	18895	18912	18605	2,6	0,128	0,129	0,135	0,131	2,4
PC4-FA4-BFS2	18683	19570	18789	19014	2,1	0,118	0,115	0,107	0,113	4,1

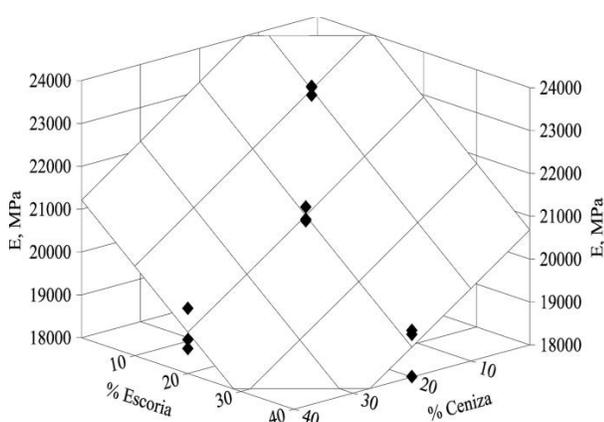


Figura 10. Tendencias obtenidas en módulo de elasticidad.

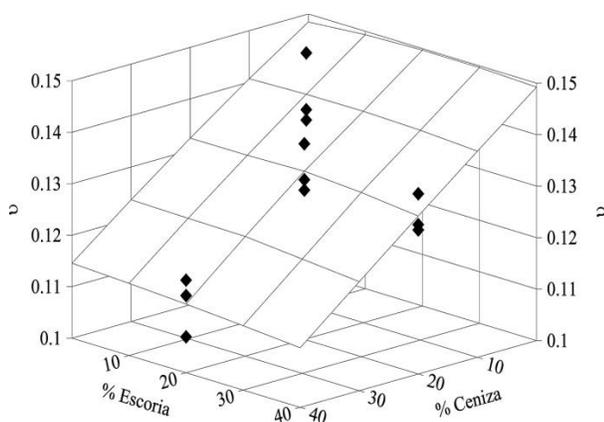


Figura 11. Tendencias obtenidas en relación de Poisson.

contenido de escoria PC4-FA2-BFS4. También la mezcla PC8-FA1-BFS1 presentó el valor más elevado de módulo de elasticidad de todas las mezclas ternarias. Como se observa en la Figura 9, la adición 40% de ceniza en la mezcla PC4-FA4-BFS2 incrementa ligeramente el módulo de

elasticidad del concreto en comparación con el 40% de adición de escoria para la mezcla PC4-FA2-BFS4, esto debido a la reducción en la porosidad que confieren las partículas de ceniza a la matriz. Así, cuando el porcentaje de reemplazo de la ceniza volante es alto, el efecto microllenante por estancamiento llega a ser significativo [2]. De hecho, ha sido demostrado que el efecto filler o efecto llenante de las adiciones minerales puede ser igual o más importante que sus efectos puzolánicos [24]. En adición, como se observa en la Tabla 5, el módulo de elasticidad de la mezcla ternaria PC8-FA1-BFS1 estuvo comprendido entre los valores de las mezclas binarias PC8-FA2 y PC8-BFS2, y el módulo de elasticidad de la mezcla ternaria PC6-FA2-BFS2 estuvo comprendido entre los valores de las mezclas binarias PC6-FA4 y PC6-BFS4.

3.2.2.2 Relación de Poisson

Como se observa en la Figura 11, la mezcla PC8-FA1-BFS1 presentó los valores más altos de relación de Poisson de las mezclas ternarias. También la mezcla PC8-FA1-BFS1 exhibió valores de relación de Poisson 6% de incremento con referencia a la mezcla PC6-FA2-BFS2. De forma similar la mezcla ternaria con el contenido de ceniza volante más alto, esto es PC4-FA4-BFS2, presentó valores de relación de Poisson 14% de decremento con respecto a la mezcla ternaria con el más alto contenido de escoria PC4-FA2-BFS4, esto corresponde al efecto de relleno que proporcionan las partículas de ceniza en el concreto, ya que aumentan su rigidez y disminuyen su deformabilidad. Adicionalmente, como se observa en la Tabla 5, la relación de Poisson 0.141 de la mezcla ternaria PC8-FA1-BFS1 estuvo comprendida entre los valores 0.139 y 0.154

correspondientes a las mezclas binarias PC8-FA2 y PC8-BFS2; y la relación de Poisson 0.133 de la mezcla ternaria PC6-FA2-BFS2 estuvo comprendida entre los valores 0.122 y 0.150 propios de las mezclas binarias PC6-FA4 y PC6-BFS4, respectivamente.

3.2.3 Resistencia a la tracción

Los resultados de los ensayos en tracción, f_t , para las mezclas ternarias a edad de 90 días se muestran en la Tabla 6. De igual forma, los resultados en módulo de rotura para las mezclas binarias se muestran en la Tabla 6, y son mediciones de referencia adaptadas del trabajo de Cárdenas *et al.* [12]. Las tendencias obtenidas en resistencia a la tracción para las mezclas ternarias se muestran en la Figura 12.

Tabla 6. Resultados de resistencia a tracción para cada tipo de mezcla [MPa].

Identificación	Esp 1	Esp 2	Esp 3	X	CV%
PC8-FA2	3,11	3,37	3,19	3,22	3,3
PC8-BFS2	3,33	3,45	3,49	3,42	3,4
PC6-FA4	2,83	2,80	2,58	2,74	2,7
PC6-BFS4	3,28	3,20	3,11	3,20	3,2
PC8-FA1-BFS1	3,20	3,41	3,48	3,36	3,5
PC6-FA2-BFS2	2,68	2,99	2,95	2,87	4,8
PC4-FA2-BFS4	2,22	2,51	2,34	2,36	5,0
PC4-FA4-BFS2	1,90	1,66	2,03	1,86	8,2

El comportamiento en tracción de las mezclas ternarias fue similar al hallado en compresión. Como se observa en la Figura 12, la mezcla PC8-FA1-BFS1 presentó los valores más significativos de resistencia a tracción de todas las mezclas ternarias. Se observó que la mezcla PC8-FA1-BFS1 exhibió resistencias a tracción 15% con mayor valor en comparación a la mezcla PC6-FA2-BFS2; y la mezcla ternaria con el contenido mayoritario de ceniza volante (PC4-FA4-BFS2), presentó resistencias a tracción 21% menores a la mezcla ternaria con mayor contenido de escoria PC4-FA2-BFS4. Adicionalmente, como se observa en la Tabla 6, la resistencia a tracción 3.36 MPa de la mezcla ternaria PC8-FA1-BFS1 estuvo comprendida entre los valores 3.22 MPa y 3.42 MPa de las mezclas binarias PC8-FA2 y PC8-BFS2, respectivamente; y la resistencia a tracción 2.87 MPa de la mezcla ternaria PC6-FA2-BFS2 estuvo comprendida entre los valores 2.74 MPa y 3.20 MPa de las mezclas binarias PC6-FA4 y PC6-BFS4, respectivamente.

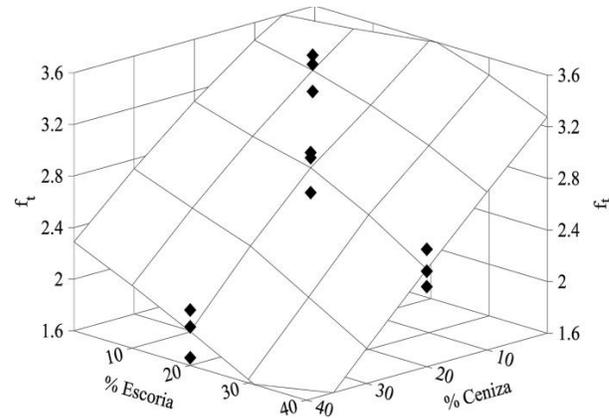


Figura 12. Tendencias obtenidas en tracción.

3.2.4 Módulo de rotura

Los resultados de los ensayos en módulo de rotura, f_r , para las mezclas ternarias a edad de 90 días se muestran en la Tabla 7. De igual forma, los resultados en módulo de rotura para las mezclas binarias se muestran en la Tabla 7, y son mediciones de referencia adaptadas del trabajo de Cárdenas *et al.* [12]. Las tendencias obtenidas en módulo de rotura para las mezclas ternarias se muestran en la Figura 13.

El comportamiento en módulo de rotura de las mezclas ternarias fue similar al hallado en compresión. Como se observa en la Figura 13, la mezcla PC8-FA1-BFS1 presentó los mayores incrementos de módulo de rotura de todas las mezclas ternarias.

Tabla 7. Resultados de módulo de rotura para cada tipo de mezcla [MPa].

Identificación	Esp 1	Esp 2	Esp 3	X	CV%
PC8-FA2	3,27	3,20	3,41	3,29	2,7
PC8-BFS2	3,43	3,50	3,64	3,52	2,4
PC6-FA4	2,93	3,05	2,90	2,96	2,2
PC6-BFS4	3,39	3,27	3,41	3,36	1,9
PC8-FA1-BFS1	3,59	3,63	3,23	3,48	5,2
PC6-FA2-BFS2	2,93	3,19	3,02	3,05	3,5
PC4-FA2-BFS4	2,01	1,95	2,39	2,12	9,2
PC4-FA4-BFS2	2,10	2,33	2,23	2,22	4,2

Se observó que la mezcla PC8-FA1-BFS1 exhibió valores de módulo de rotura 12% más altos que la mezcla PC6-FA2-BFS2; y la mezcla ternaria con la mayor proporción de contenido de ceniza volante, esto es PC4-FA4-BFS2, presentó valores de módulo de rotura del 4% de disminución con referencia a la

mezcla ternaria con un alto contenido de escoria PC4-FA2-BFS4. Adicionalmente, como se observa en la Tabla 7, el módulo de rotura 3.48 MPa de la mezcla ternaria PC8-FA1-BFS1 estuvo comprendido entre los valores 3.29 MPa y 3.52 MPa de las mezclas binarias PC8-FA2 y PC8-BFS2, respectivamente; y el módulo de rotura 3.05 MPa de la mezcla ternaria PC6-FA2-BFS2 estuvo comprendido entre los valores 2.96 MPa y 3.36 MPa de las mezclas binarias PC6-FA4 y PC6-BFS4, respectivamente.

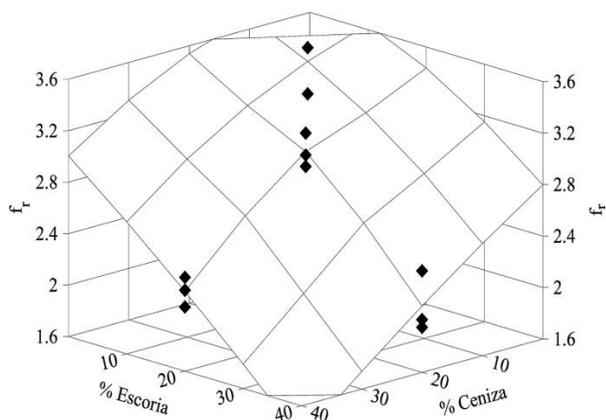


Figura 13. Tendencias obtenidas en módulo de rotura.

3.2.5 Sinergia entre las adiciones de ceniza volante y escoria en el concreto

El efecto combinado de las adiciones de ceniza volante y escoria de alto horno sobre el desempeño mecánico del concreto ha sido examinado en el presente estudio. Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión, tracción, módulo de rotura, módulo de elasticidad y relación de Poisson, en general, permiten demostrar que las propiedades de las mezclas ternarias se encuentran comprendidas dentro del intervalo de propiedades mecánicas de las mezclas binarias, aproximadamente como el promedio de sus valores. Por ejemplo, para los ensayos en compresión a 90 días, se observó que la mezcla ternaria PC8-FA1-BFS1 con una resistencia de 25.14 MPa, superó la resistencia obtenida por la mezcla binaria PC8-FA2 (23.13 MPa) pero a su vez fue menor a la resistencia obtenida por la mezcla PC8-BFS2 (27.77 MPa). También, la mezcla ternaria PC6-FA4-BFS4 exhibió una resistencia en compresión de 23.59 MPa mayor a la resistencia presentada por la mezcla binaria PC6-FA4 (20.30 MPa) y menor a la resistencia de la mezcla PC6-BFS4 con 26.77 MPa.

Por lo tanto, como se observa en las Figuras 8 a 13 para las edades de 28 y 90 días evaluadas en este estudio, en general las propiedades mecánicas de las mezclas ternarias pueden ser calculadas aproximadamente como el promedio de las propiedades de las mezclas binarias. Tan y Pu [25] evaluaron la combinación de ceniza volante y escoria de alto horno finamente molidos mediante adiciones simultáneas de 10% para los dos materiales, y encontraron que la resistencia a compresión del concreto al incorporar esta combinación resultó mayor a la resistencia de los concretos con adiciones 10% de ceniza volante y 10% escoria de alto horno por aparte; de manera que Tan y Pu [25] concluyen que la combinación de ceniza volante y escoria de alto horno presenta una mayor actividad y resistencia a compresión que cada uno de estos componentes adicionados por separado. No obstante, Hale *et al.* [26] evaluaron la influencia del cemento con escoria y ceniza volante sobre las propiedades del concreto para ser usado en pavimentos, y observaron que la resistencia a compresión de las mezclas ternarias estuvo comprendida entre los valores de las mezclas binarias de ceniza y escoria, lo cual es acorde a los resultados encontrados en el presente estudio. Por su parte, Gesoglu *et al.* [27] efectuaron un estudio experimental para investigar las propiedades de los concretos autocompactantes con adiciones minerales y como resultado, se observó que las resistencias a compresión de las mezclas ternarias con ceniza volante y escoria estuvieron comprendidas entre los valores de las mezclas binarias de escoria de alto horno como límite superior y ceniza volante como límite inferior, aproximadamente como el promedio de estos valores; esta tendencia del mismo modo fue observada en el presente trabajo para todas las propiedades mecánicas evaluadas a edades de 28 y 90 días. Similares resultados han sido hallados en otros estudios [4,28,29].

El efecto de sinergia entre la adiciones de ceniza volante y escoria de alto horno en la mezcla asimismo ha sido descrito previamente. Fraay *et al.* [23] afirman que los cementos con bajo desarrollo de pH tales como los mezclados con humo de sílice y escoria de alto horno ocasionan que la ceniza volante en la mezcla sea menos reactiva. La reacción de la ceniza volante tipo F requiere alta alcalinidad del agua de poros, y su alcalinidad se reduce cuando el humo de sílice o la escoria están presentes en la mezcla. Consecuentemente, la

reactividad de la ceniza volante en estas condiciones es reducida [30]. Berry [31] examinó el desarrollo de resistencias en compresión de morteros hechos con mezclas de cemento Portland, ceniza volante y escoria de alto horno y observó que no hay interacciones entre la escoria y la ceniza volante, y que cada componente manifiesta sus propias propiedades cementantes en el proceso de hidratación, efecto que también fue evidenciado en el presente estudio. También, Burris y Riding [28] sugieren que la ceniza volante clase F en mezclas ternarias con humo de sílice o con escoria de alto horno no reacciona sinérgicamente en relación al desarrollo de resistencias a compresión y por

consiguiente las resistencias de estas mezclas ternarias con ceniza volante y escoria de alto horno o humo de sílice pueden ser predichas superponiendo los efectos de cada material individualmente. En virtud de lo señalado, y con base en los resultados del presente estudio, es oportuno afirmar que la ceniza volante y la escoria no presentan interacción alguna en sus propiedades, sino más bien estos materiales coexisten en la matriz y aportan de forma individual resistencias al concreto a casusa de su reacción con el cemento Portland.

Tabla 8. Ecuaciones propuestas para la determinación de las propiedades mecánicas de las mezclas ternarias.

<i>Propiedad</i>	<i>Ecuación Propuesta</i>	<i>Unidad</i>
Resistencia a compresión	$f_c = A + B \cdot \% \text{Ceniza} + C \cdot \% \text{Escoria}$	MPa
Módulo de elasticidad	$E_c = A + B \cdot \% \text{Ceniza} + C \cdot \% \text{Escoria}$	MPa
Relación de Poisson	$\nu = A + B \cdot \% \text{Ceniza} + C \cdot \% \text{Escoria}$	-
Resistencia a tracción	$f_t = A + B \cdot \% \text{Ceniza} + C \cdot \% \text{Escoria}$	MPa
Módulo de Rotura	$f_r = A + B \cdot \% \text{Ceniza} + C \cdot \% \text{Escoria}$	MPa

Tabla 9. Constantes de las ecuaciones propuestas para la determinación de las propiedades mecánicas de las mezclas.

<i>Parámetro</i>	<i>Constante</i>			<i>Coefficiente de correlación</i>
	A	B	C	
f_c 28 días	15,7261	-0,0626	-0,1385	$r = 0,92$
f_c 90 días	31,2227	-0,3191	-0,1761	$r = 0,90$
E_c	25208,5760	-96,4841	-116,9008	$r = 0,96$
ν	0,1510	9,136E-4	-4,695E-5	$r = 0,87$
f_t	4,0521	-0,0443	-0,0196	$r = 0,93$
f_r	4,2412	-0,0313	-0,0365	$r = 0,81$

A partir de las tendencias de los resultados medidos, en la Tabla 8 se proponen modelos de predicción de los parámetros mecánicos para las mezclas ternarias, y en la Tabla 9 se presentan las constantes empleadas en dicha determinación. La dispersión de estos parámetros fue evaluada mediante el coeficiente de correlación r, definido como un indicador de la intensidad de la relación lineal entre los valores estimados y los datos experimentales. Con base en los valores r de las ecuaciones, se puede afirmar que los modelos de predicción propuestos son adecuados, ya que estos valores

varían entre 0.80 y 0.96; es decir, son cercanos a 1. Lo anterior indica que existe una estrecha relación entre los parámetros observados y los calculados.

4. CONCLUSIONES

En el presente estudio se ha evaluado el efecto de las adiciones de ceniza volante y escoria de alto horno sobre las propiedades mecánicas de concretos de composición ternaria, y se han efectuado ensayos de laboratorio para determinar su comportamiento en función de las dosificaciones empleadas. Lo resultados hallados permiten concluir lo siguiente:

La mezcla con adiciones 10% ceniza volante y 10% escoria de alto horno resultó ser la de mejor desempeño mecánico entre las 4 mezclas ternarias evaluadas. Adicionalmente, se observó que reemplazos mayores al 10% de ceniza volante y escoria de alto horno disminuyen las resistencias a compresión, tracción y módulo de rotura del concreto a la edad final evaluada de 90 días.

Para edades iniciales de mezclas de concreto adicionadas, en el presente estudio evaluadas a 28 días, los contenidos predominantes de ceniza volante representan menor desempeño mecánico del concreto, en comparación con las adiciones de escoria de alto horno. Lo anterior puede ser atribuido a que en edades tempranas, la forma esférica de las partículas y los mayores contenidos de ceniza sin reaccionar se alojan en las porosidades y permanecen inertes al interior de la matriz cementante.

La adición de escoria de alto horno promovió las mayores resistencias a compresión a edad de 90 días para todas las mezclas ternarias, en comparación con la ceniza volante, lo cual puede ser atribuido a la naturaleza hidráulica de la escoria y la lenta reacción puzolánica de la ceniza volante. Asimismo, el efecto de la escoria fue notable en el mejoramiento y optimización de las demás propiedades mecánicas evaluadas, esto es, resistencia a la tracción, módulo de rotura, módulo de elasticidad y relación de Poisson. No obstante, para el caso de la ceniza volante, se espera que dichas propiedades mecánicas incrementen en edades posteriores a causa de la reacción puzolánica generada.

La resistencia a compresión de mezclas ternarias depende fundamentalmente del aporte de las mezclas binarias por independiente. Así, para la edad final evaluada a 90 días, las resistencias a compresión de las mezclas ternarias resultaron ser aproximadamente el promedio en compresión de las mezclas binarias. En este sentido, se observó que la ceniza volante y la escoria no presentan interacción alguna en sus propiedades, sino más bien estos materiales coexisten en la matriz y aportan de forma independiente resistencias al concreto a causa de su reacción con el cemento Portland. Las tendencias obtenidas en los ensayos de resistencia a la tracción, módulo de rotura, módulo de elasticidad y relación de Poisson resultaron ser similares a las observadas en compresión.

Las ecuaciones propuestas aplican para sistemas ternarios de concretos adicionados empleando cenizas volantes y escorias de alto horno, con resistencias a compresión a 90 días entre 15 y 25 MPa. No obstante, aunque los resultados pueden variar ligeramente de acuerdo a la naturaleza de las cenizas y escorias, dichas ecuaciones ilustran adecuadamente el comportamiento de este tipo de concretos y sus propiedades mecánicas de compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson, tracción y módulo de rotura.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada por el financiamiento del proyecto ING 1572. De igual forma a la compañía Acerías Paz del Río por la donación del material de escoria suministrado.

6. REFERENCIAS

- [1]. Olanrewaju, D.O., Akinpelu, A.A., "Lightweight concrete using local industrial by product," *Journal of Mechanics Engineering and Automotion*, vol. 4, pp. 505-510, 2014.
- [2]. Wang, X.Y., Lee, H.S., "Modeling the hydration of concrete incorporating fly ash or slag," *Cement and Concrete Research*, vol 40, pp. 984-996, 2010. DOI:10.1016/j.cemconres.2010.03.001.
- [3]. Saeki, T., Monteiro, P.J.M., "A model to predict the amount of calcium hydroxide in concrete containing mineral admixture," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 10, pp. 1914-1921, October 2005. DOI:10.1016/j.cemconres.2004.11.018.
- [4]. Sengul, O., Tasdemir, M., "Compressive strength and rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash and slag," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol.21, no. 9, pp. 494-501, September 2009. DOI:http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:9(494).
- [5]. Li, D., Shen, J., Chen, Y., Cheng, L., Wu, X., "Study of properties of fly ash-slag complex cement." *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 9, pp. 1381-1387, September 2000. DOI:10.1016/S0008-8846(00)00360-4.
- [6]. Nagataki, S., "Mineral admixtures in concrete: State of the art and trends". En: *Proceedings on Concrete Technology: Past, Present, and Future*, SP-144. Detroit: American Concrete Institute, 1994, p. 447.
- [7]. Wang, D.H., Chen, Z.Y., "Mix Design of High Performance Concrete," *Concrete (in Chinese)*,

- No. 3, June 1996.
DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392011005000088>.
- [8]. Li, G., Zhao, X., "Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag," *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no. 3, pp.293–299, April 2003. DOI:10.1016/S0958-9465(02)00058-6.
- [9]. Shen, D.S., Mao, Z.E., "High quality fly ash concrete", Shanghai Science and Technology Press, pp. 54-57, 1992.
- [10]. Norma ASTM C 39-15, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, Vol. 04.02, Filadelfia (EE.UU.): American Society of Testing and Materials (ASTM), 2015.
- [11]. Norma ASTM C 469-14, Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression, Vol. 04.02, Filadelfia (EE.UU.): American Society of Testing and Materials (ASTM), 2014.
- [12]. Cárdenas, J., Lizarazo, J., Aperador, W., "Comportamiento mecánico de sistemas cementantes binarios (cemento portland – ceniza volante – escoria de alto horno)," *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 36, no. 1, pp. 78-98, Diciembre 2015.
- [13]. Norma ASTM C 496-11, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, Vol. 04.02, Filadelfia (EE.UU.): American Society of Testing and Materials (ASTM), 2011.
- [14]. Norma ASTM C 78-15, Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading), Vol. 04.02, Filadelfia (EE.UU.): American Society of Testing and Materials (ASTM), 2015.
- [15]. Pap, A.E., Kordas, K., Peura, R., Leppavuori, S., "Simultaneous chemical silver and palladium deposition on porous silicon," *FESEM, TEM, EDX and XRD investigation Applied Surface Science*, vol. 201, no. 1-4, pp. 56–60, November 2002. DOI:10.1016/S0169-4332(02)00489-0.
- [16]. Khankhaje, E., Hussin, M.W., Mirza, J., Rafieizonooz, M., Salim, M.R., Siong, H.C., Warid, M.N.M., "On blended cement and geopolymer concretes containing palm oil fuel ash," *Materials & Design*, vol. 89, no. 5, pp. 385-398, January 2016. DOI:10.1016/j.matdes.2015.09.140.
- [17]. Qiao, X.C., Ng, B.R., Tyrer, M., Poon, C.S., Cheeseman, C.R., "Production of lightweight concrete using incinerator bottom ash," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 4, pp. 473-480, April 2008. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.11.013.
- [18]. Salah, A. Abo-El-Enein, Hamdy, A. El-Sayed, Ali, H. Ali, Yasser, T.M., Hisham M.K., Ahmed S.O., "Physico-mechanical properties of high performance concrete using different aggregates in presence of silica fume," *HBRC Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 43-48, April 2014. DOI:10.1016/j.hbrcj.2013.06.002.
- [19]. Ectors, D., Neubauer, J., Goetz-Neunhoffer, F., "The hydration of synthetic brownmillerite in presence of low Ca-sulfate content and calcite monitored by quantitative in-situ-XRD and heat flow calorimetry," *Cement and Concrete Research*, vol. 54, pp. 61-68, December 2013. DOI:10.1016/j.cemconres.2013.08.011.
- [20]. Stöber, S., Redhammer, G., Schorr, S., Prokhnenko, O., Pöllmann, H., "Structure refinements of members in the brownmillerite solid solution series $\text{Ca}_2\text{Al}_x(\text{Fe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_{2-x}\text{O}_5+\delta$ with $1/2 \leq x \leq 4/3$," *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 197, pp. 420-428, January 2013. DOI:10.1016/j.jssc.2012.08.032.
- [21]. Mikhailova, O., Yakovlev, G., Maeva, I., Senkov, S., "Effect of dolomite limestone powder on the compressive strength of concrete," *Procedia Engineering*, vol. 57, pp. 775-780, 2013. DOI:10.1016/j.proeng.2013.04.098.
- [22]. Lawrence, P., Cyr, M., Ringot, E., "Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short-term hydration," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 1939–1947, 2003. DOI:10.1016/S0008-8846(03)00183-2.
- [23]. Fraay, A.L.A., Bijen, J.M., De Haan, Y.M., "The reaction of fly ash in concrete: A critical examination," *Cement and Concrete Research*, vol. 19, no.2, pp. 235–246, March 1989. DOI:10.1016/0008-8846(89)90088-4.
- [24]. Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G., Moraes, R., "Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high performance concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no. 1, pp. 69–76, January 2003. DOI:10.1016/S0958-9465(01)00057-9.
- [25]. Tan, K., Pu, X., "Strengthening effects of finely ground fly ash, granulated blast furnace slag and their combination," *Cement and Concrete Research*, vol.28, no.12, pp.1819-1825, December 1998. DOI:10.1016/S0008-8846(98)00158-6.
- [26]. Hale, W.M., Freyne, S.F., Bush Jr, T.D., Russell, B.W., "Properties of concrete mixtures containing slag cement and fly ash for use in transportation

- structures” *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 1990–2000, September 2008. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.004.
- [27]. Gesoglu, M., Güneyisi, E., Özbay, E., “Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 5, pp. 1847–1854, May 2009. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.015.
- [28]. Burris, L.E., Riding, K.A., “Diffusivity of binary and ternary concrete mixture blends,” *ACI Materials Journal*, vol. 111, no. 4, pp. 373-382, July 2014.
- [29]. Sung-IL Jeon, Jeong-Hee Nam, Jin-Beom Lee, Soo-Ahn Kwon, “Physical property of ternary blend concrete using finely-ground fly ash and finely-ground granulated blast furnace slag”, En: *Proceedings del 13th REEAA Conference*. Korea: Road Engineering Association of Asia and Australasia, September 2009, p. 11.
- [30]. Neville, A. *Properties of Concrete*, 5a ed. England: Pearson Educational Ltd., 2011, p. 872.
- [31]. Berry, E.E., “Strength Development of Some Blended Cement Mortars,” *Cement & Concrete Research*, vol. 10, no. 1, pp. 1-11, January 1980. DOI:10.1016/0008-8846(80)90046-0.