

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE SISTEMAS CEMENTANTES BINARIOS (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.

* *u1100907@unimilitar.edu.co***RESUMEN**

Con el propósito de suministrar materiales que contribuyan con el sostenimiento del medio ambiente, se han desarrollado mezclas binarias que corresponden a sistemas cementicios de cemento Portland–ceniza volante, cemento Portland–escoria de alto horno y ceniza volante–escoria de alto horno. El programa experimental comprendió el ensayo de 120 especímenes de concreto para 8 mezclas de diferentes dosificaciones, para las que fueron evaluadas sus propiedades mecánicas en compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson, tracción y módulo de rotura. La activación de las mezclas de concreto sin cemento Portland se realizó mediante la combinación de activantes alcalinos como el silicato de sodio y el hidróxido de sodio. La caracterización de las materias primas en polvo se realizó mediante análisis de fluorescencia. Los resultados obtenidos indican que los concretos adicionados presentan las mejores propiedades mecánicas para contenidos de cenizas volantes y escorias de alto horno equivalentes al 20%. Asimismo, los concretos con activación alcalina presentan desempeños mecánicos comparables y/o superiores a los obtenidos por los concretos adicionados evaluados en este estudio.

Palabras Claves: Concretos adicionados, concretos de activación alcalina, propiedades mecánicas.

MECHANICAL PERFORMANCE OF CEMENTITIOUS BINARY SYSTEMS (PORTLAND CEMENT–FLY ASH–BLAST FURNACE SLAG)

ABSTRACT

In order to provide materials that contribute to environmental sustainability, binary blends were developed corresponding to cementitious systems such as Portland cement–fly ash, Portland cement–blast furnace slag and fly ash–blast furnace slag. In this experimental program were tested 120 concrete specimens from 8 mixtures having different dosages. For these, their mechanical properties in compression, modulus of elasticity and Poisson's ratio, tensile and modulus of rupture were evaluated. Activation of samples without Portland cement was made by combining alkali activators such as sodium silicate and sodium hydroxide. The characterization of the raw materials was performed by fluorescence analysis. The results indicate that blended concretes present the best mechanical properties for fly ash and blast furnace slag contents equivalent to 20%. Also, alkali activated concretes show comparable and/or higher mechanical performance than those obtained by blended concretes evaluated in this study.

Keywords: Blended concretes, alkali activated concretes, mechanical properties.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la demanda del concreto como material de construcción empleado en las obras civiles ha incrementado considerablemente en función del crecimiento de la población mundial. El concreto u hormigón como material constructivo presenta grandes beneficios en cuanto a desempeño mecánico y durabilidad, siendo este una alternativa tradicional de uso en la fabricación de obras de infraestructura, tales como viviendas, edificios, túneles, presas, pisos industriales, entre otros. Sin embargo, el uso masivo del cemento Portland como precursor cementante en la mezcla ha contribuido al aumento de los niveles de contaminación a nivel global por sus procesos de producción involucrados. 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]. Cabe anotar, que en el proceso de manufactura de una tonelada de cemento Portland ordinario se libera alrededor de una tonelada de CO_2 a la atmósfera, además de emisiones de SO_x y NO_x . Se estima que un 50% del CO_2 proviene de la reducción de la caliza en el proceso de clinkerización, mientras el CO_2 restante es atribuido al uso de combustibles fósiles [2,3]. De la misma forma, en la industria del cemento y el concreto también han sido empleados algunos subproductos en la producción de mezclas como reemplazo parcial del cemento Portland en diferentes dosificaciones. Entre las adiciones minerales más utilizadas se encuentran las cenizas volantes (Fly Ash-FA), escorias de alto horno (Blast Furnace Slag-BFS), metacaolín (Metakaolin-MK) y humo de sílice (Silica Fume-SF), entre otras.

Las cenizas volantes son subproductos provenientes de procesos de generación eléctrica mediante la calcinación de carbón pulverizado en plantas termoeléctricas. Más de 1.5 billones de toneladas de ceniza volante son generadas cada año a nivel global, y su aprovechamiento es tan solo del 20% al 25% en el campo de la construcción [4]. De acuerdo con su morfología, composición química y mineralógica, y tamaño de partículas, las cenizas volantes presentan una mayor o menor actividad puzolánica. Es decir, las partículas de ceniza volante reaccionan en un medio acuoso y alcalino, con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación

de los silicatos de calcio, generando la formación adicional de compuestos similares al gel CSH [5]. Así, la utilización de cenizas volantes como reemplazo parcial del cemento, presenta desde un punto de vista teórico, efectos benéficos tales como una menor demanda de agua en la mezcla, disminución de la segregación, disminución del calor de hidratación y control de la fisuración a edades tempranas [6]. Por lo tanto, su empleo como adición resulta en una alternativa económica y útil para el mejoramiento de las propiedades y desempeño del concreto, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Por otro lado, la escoria de alto horno es un subproducto de la fabricación del arrabio o fundición de hierro, el cual se separa de ésta en estado líquido (fundido) dentro del alto horno [7,8]. Cuando se enfría rápidamente (templada) con agua (granulación) o con aire (peletización), se obtiene un producto vítreo, que finalmente molido produce un polvo cementicio de propiedades potencialmente hidráulicas. La actividad hidráulica de las escorias depende fundamentalmente de su estructura mineralógica, la cual está relacionada con la composición química e influye en la fase vítrea de la misma. Las soluciones activantes incorporadas deben acelerar la solubilización de la escoria, favorecer la formación de hidratos estables y la formación de una estructura compacta con estos hidratos.

Los activantes usados con la escoria pueden ser compuestos alcalino o alcalinotérreos como hidróxidos, sales de ácido débil (R_2CO_3 , R_2S , RF), sales de ácido fuerte (Na_2SO_4 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y sales silícicas del tipo $\text{R}_2\text{O}(n)\text{SiO}_2$ donde R es un ión alcalino del tipo Na, K ó Li. Entre estos, el silicato de sodio y el hidróxido de sodio, han sido reportados como los activantes más efectivos, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas y de durabilidad que se obtienen en los productos finales [9]. El principal producto de hidratación que se forma en este tipo de material es el silicato cálcico hidratado (CSH); esta fase gel se diferencia de la de la pasta de cemento Portland por tener una menor relación C/S. La formación de otras fases o compuestos hidratados va a depender del tipo y cantidad del activante empleado, de la estructura y composición de la escoria y de las condiciones de curado bajo las cuales se va a desarrollar el endurecimiento [10].

Adicionalmente, el desarrollo y aplicación de materiales cementantes sin cemento Portland, mediante la activación alcalina de aluminosilicatos tales como la escoria de alto horno, ceniza volante y metakaolin, está ganando gran importancia debido a la necesidad de emplear materiales sostenibles para construcción. Los cementos activados alcalinamente, también denominados geopolímeros, han demostrado ser una alternativa valiosa para su uso en la producción del concreto. Entre los sistemas cementantes activados alcalinamente, las cenizas volantes y escorias granuladas de alto horno han sido los materiales más estudiados. Lo anterior es debido al adecuado proceso de activación que presentan, y a la formación de los productos cementantes que generan, en la escoria por la formación del gel C-(A)-S-H y en la ceniza por la formación del gel N-A-S-H. En estado endurecido, el desempeño mecánico de las mezclas de ceniza volante y de escoria activadas alcalinamente depende principalmente de la composición química de los agentes alcalinos, de la naturaleza y calidad de los materiales puzolánicos y del tipo de curado efectuado. Incluso, estos materiales presentan buenas resistencias a la corrosión, sulfatos, cloruros y ácidos. Según Chanh *et al.* [11] los cementos alcalinos ostentan un óptimo desempeño en entornos agresivos, de tal forma que pueden ser empleados adecuadamente para construir estructuras sometidas a ambientes marinos. También se afirma que como materiales cementantes presentan propiedades únicas, tales como altas resistencias a tempranas edades, baja contracción, resistencia al hielo-deshielo, a los sulfatos y a la corrosión [12]. Como resultado, estos materiales exhiben propiedades mecánicas comparables con las presentadas por los concretos de cemento Portland tradicional, además de una adecuada durabilidad [13].

Con el propósito de contribuir a reducir la emisión de gases a la atmósfera y estudiar las propiedades mecánicas de los concretos adicionados y los de activación alcalina, se llevó a cabo la presente investigación. En esta, se desarrollaron y evaluaron a través de ensayos mecánicos varios materiales cementantes alternativos tales como mezclas binarias entre cenizas volantes, escoria de alto horno y cemento Portland. Lo anterior con fin de formular modelos de predicción que describan su comportamiento en función del porcentaje de adición utilizado. Cabe destacar que la fabricación de mezclas adicionadas genera un consumo

energético menor al de los concretos tradicionales, esto debido a la menor utilización de cemento Portland en el proceso de manufactura. No obstante, la activación alcalina de las mezclas confiere ahorros energéticos aún mayores en la medida que se adopten materiales subproductos como reemplazo total del cemento. En cualquiera de los casos, se reduce la emisión de gases contaminantes a la atmósfera y se podrán mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad del compuesto con una disminución en los costos de producción asociados.

2. PARTE EXPERIMENTAL

El programa experimental comprendió la elaboración de 8 mezclas binarias de concreto constituidas por 4 mezclas con cemento y 4 mezclas de concreto de activación alcalina, con diferentes dosificaciones de cemento Portland, ceniza volante y escoria de alto horno. Posteriormente, se efectuó el ensayo de 120 especímenes conformados por 96 especímenes cilíndricos y 24 especímenes en forma de vigas, para las diferentes mezclas fabricadas.

2.1 Materiales

En este estudio se utilizó cemento Portland comercial Tipo I, ceniza volante clase F proveniente de la planta termoelectrónica de Termo-Paipa (Colombia) y escoria granulada de alto horno proveniente de la planta de Acerías Paz del Río (Colombia). Su caracterización se realizó mediante ensayos de fluorescencia y de granulometría laser. La composición química y granulometría de los materiales se resumen en la Tabla 1 y en la Figura 1, respectivamente.

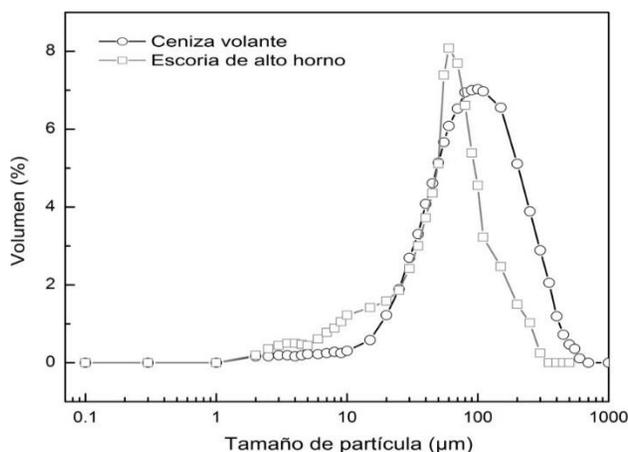


Figura 1. Curvas granulométricas de los materiales cementantes utilizados en las mezclas.

Como material pétreo se empleó agregado fino tipo arena de río con módulo de finura de 3,04 y 0,81% de absorción. Como agregado grueso se utilizó una grava fina de trituración color gris con Tamaño Máximo Nominal (TMN) de 12 mm. Para garantizar la trabajabilidad de las mezclas, se utilizó un aditivo súper-plastificante denominado Viscocrete 2100 de SIKA [Error! Reference source not found.].

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	-

2.2 Soluciones activantes

En este estudio se empleó una mezcla de dos tipos de activantes alcalinos, silicato de sodio (Na₂SiO₃) e hidróxido de sodio (NaOH 14M). El silicato de sodio empleado para las mezclas fue de tipo industrial y composición 9,1% Na₂O, 27,5 % SiO₂ y 63,4% H₂O, con relación SiO₂/Na₂O de 3,02. La solución de hidróxido de sodio fue preparada en condiciones de laboratorio, disolviendo las lentejas

Panreac PA-ACS-ISO (98% de pureza) [15], en agua destilada para obtener la concentración deseada. Para las mezclas de concreto geopolimérico, la combinación de los activantes alcalinos fue premezclada y almacenada en condiciones de humedad y temperatura ambiente durante 24 horas, previo a la fabricación de los especímenes.

2.3 Mezclas de concreto

Para obtener una mezcla de concreto con resistencia de diseño de 19 MPa a edad de 28 días y un asentamiento de 240 mm (9.5 pulg), la relación líquido/sólido de la mezcla fue de 0,5 para un contenido de material cementante de 448 kg/m³. Se fabricaron mezclas binarias mediante la combinación de los diferentes materiales cementantes utilizados. De este modo, se prepararon 4 mezclas de cemento Portland con reemplazos parciales de ceniza volante y escoria de alto horno, y 4 mezclas de activación alcalina por la sola activación de la ceniza volante y la escoria. 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 ingles. 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; PC6-BFS4 representa la mezcla de 60% cemento Portland y 40% escoria de alto horno; FA6-BFS4 representa la mezcla de 60% ceniza volante y 40% escoria de alto horno.

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)	Hidróxido de sodio (kg/m ³)	Plastificante (kg/m ³)
PC8-FA2	316,3	79,1	-	880,1	732,9	197,7	19,8	-	4,0
PC8-BFS2	318,9	-	79,7	887,5	739,1	199,3	19,9	-	3,2
PC6-FA4	234,8	156,5	-	871,1	725,3	195,6	19,6	-	4,7
PC6-BFS4	238,6	-	159,1	885,2	737,1	198,8	19,9	-	4,1
FA8-BFS2	-	328,0	82,0	912,9	760,1	-	30,75	174,3	8,2
FA6-BFS4	-	248,0	165,3	920,2	766,2	-	30,75	174,3	8,2
FA4-BFS6	-	166,7	250,0	927,7	772,4	-	30,75	174,3	8,4
FA2-BFS8	-	84,0	336,1	935,3	778,8	-	30,75	174,3	8,4

2.3.1 *Cemento Portland - ceniza, cemento Portland - escoria*

Las mezclas binarias de cemento Portland-ceniza volante y cemento Portland-escoria de alto horno utilizaron como material cementante principal el cemento Portland Tipo I. Asimismo, en estas mezclas se utilizó silicato de sodio (Na_2SiO_3) a una concentración de 5% de Na_2O , expresado como porcentaje en peso total de los materiales cementantes. En el proceso de fabricación de las mezclas, los agregados y materiales cementantes fueron mezclados en seco durante un tiempo de cinco minutos, posteriormente sobre los materiales secos se agregó la suficiente cantidad de agua, silicato de sodio y plastificante, y se continuó el proceso de mezclado durante otros cinco minutos. Cada mezcla en estado fresco fue vertida en moldes y compactada adecuadamente por métodos tradicionales, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM-C-31 (2015) [16]. Los especímenes se desmoldaron luego de 24 horas de su fabricación y posteriormente fueron curados mediante inmersión en un estanque de agua con cal hasta el día del ensayo.

2.3.2 *Ceniza-escoria*

Las mezclas binarias de ceniza volante-escoria de alto horno fueron activadas mediante la combinación 85% NaOH 14M y 15% silicato de sodio. Como material cementante principal se utilizó

ceniza volante y adiciones de escoria de alto horno en diferentes porcentajes. En el proceso de fabricación de las mezclas, los agregados y materiales cementantes fueron mezclados en seco durante un tiempo de cinco minutos, luego sobre los materiales secos se agregó la suficiente cantidad de líquido activante y plastificante, y se continuó el proceso de mezclado durante otros cinco minutos. Cada mezcla en estado fresco fue vertida en moldes, apisonada y compactada adecuadamente por métodos tradicionales. Los especímenes se desmoldaron luego de 24 horas de su fabricación y a continuación fueron curados bajo un régimen de 85 °C de temperatura durante un periodo de 24 horas, esto con el fin de garantizar el desarrollo de las resistencias. Finalmente, los especímenes fueron desmoldados y alojados en un cuarto de almacenamiento con temperatura ambiente hasta el día del ensayo.

2.4 **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.

Tabla 3. Descripción y cantidad de ensayos mecánicos.

Identificación	Resistencia a compresión, f_c		Módulo de elasticidad, E_c , y relación de Poisson, ν	Resistencia a tracción, f_t	Módulo de rotura, f_r	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	
FA8-BFS2	3	3	3	3	3	15	120
FA6-BFS4	3	3	3	3	3	15	
FA4-BFS6	3	3	3	3	3	15	
FA2-BFS8	3	3	3	3	3	15	

2.4.1 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) [17]. 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. Adicionalmente, para registrar la curva completa esfuerzo-deformación unitaria y observar la capacidad de deformación máxima obtenida en compresión, se midieron las deformaciones longitudinales hasta la falla por medio de la adecuación de una galga extensiométrica sobre el espécimen. La configuración del ensayo y la falla característica de un espécimen se muestran en la Figura 2.

2.4.2 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) [18]. La configuración del ensayo se muestra en la Figura 3. 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.

2.4.3 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) [19]. 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 4.

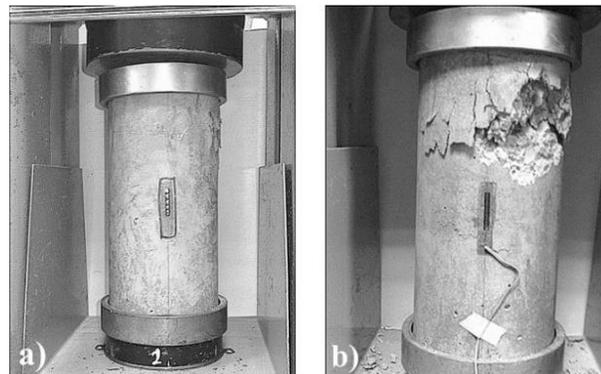


Figura 2. Configuración del ensayo de Resistencia a Compresión con deformímetros a) espécimen preparado, b) espécimen fallado.

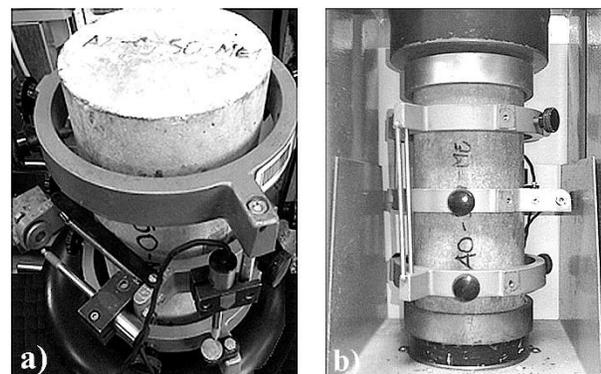


Figura 3. Configuración del ensayo de módulo de Elasticidad y relación de Poisson: a) transductores de desplazamiento, b) dispositivo compresómetro-extensómetro.

2.4.4 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) [20]. 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 5.

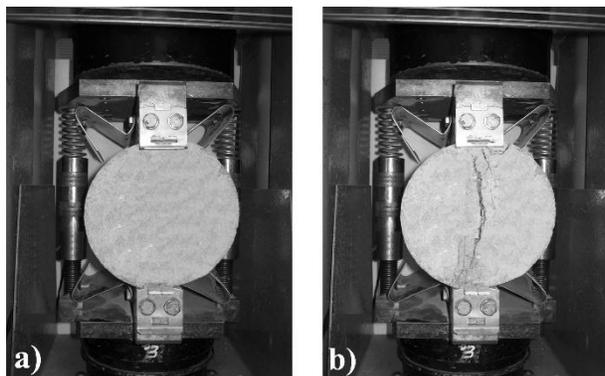


Figura 4. Ensayo de resistencia a tracción: a) configuración de ensayo, b) falla característica del espécimen.



Figura 5. 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 (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

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos realizados sobre los especímenes de concreto adicionados. A partir de los resultados obtenidos se examinaron las tendencias correspondientes y se formularon modelos de predicción de cada parámetro mecánico evaluado, para la mezclas con cemento Portland en función del

porcentaje de adición de ceniza volante y escoria de alto horno, y para las mezclas de activación alcalina (sin cemento Portland) en función del porcentaje de adición de escoria de alto horno. Para lograr mejor comprensión de la influencia de los materiales suplementarios sobre el desempeño mecánico del concreto, los resultados medidos se comparan con modelos e investigaciones similares.

Para las mezclas fabricadas fueron determinados los valores de asentamiento que reflejan el efecto de las adiciones sobre la trabajabilidad de las mezclas, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM-C-143 (2015) [21] Los resultados del asentamiento de las mezclas, se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de asentamiento para cada tipo de mezcla.

Identificación	Asentamiento, mm				
	Esp 1	Esp 2	Esp 3	X	CV %
PC8-FA2	220,0	225,3	219,8	221,0	1,4
PC8-BFS2	222,8	222,3	221,6	222,2	0,2
PC6-FA4	212,2	216,3	214,4	214,3	0,8
PC6-BFS4	225,1	226,8	226,1	226	0,3
FA8-BFS2	201,8	204,0	206,4	204,1	0,9
FA6-BFS4	208,6	207,4	204,1	206,7	0,9
FA4-BFS6	210,0	211,1	208,4	209,8	0,5
FA2-BFS8	214,6	212,7	210,2	212,5	0,8

3.1 Resistencia a compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, f_c , sobre los especímenes cilíndricos a edades de 28 días y 90 días se muestran en la Tabla 5. Las curvas esfuerzo-deformación unitaria obtenidas en compresión a la edad de 90 días se muestran en la Figura 6 y sus promedios se muestran en la Figura 7. Las tendencias obtenidas en resistencia a compresión de la mezclas se muestran en la Figura 8.

Como se observa en la Tabla 5 y en las Figuras 7, 8a y 8c, para las mezclas con cemento Portland ordinario a edades de 28 y 90 días, se encuentra el mejor desempeño en compresión cuando los contenidos de reemplazo en la mezcla son del 20%. Se observa que los valores de resistencia a compresión disminuyen con el incremento en el porcentaje de la adición utilizada, esto es, ceniza volante y escoria de alto horno. Para la edad inicial de los especímenes evaluada a 28 días, la mezcla PC6-FA4 presentó una reducción en compresión del 34% en comparación a la mezcla PC8-FA2, y la

mezcla PC6-BFS4 presentó una reducción en compresión del 20% en comparación a su similar PC8-BFS2. Posteriormente, para la edad final de los especímenes evaluada a 90 días, la mezcla PC6-FA4

presentó una reducción en compresión del 12% en comparación a la mezcla PC8-FA2, y la mezcla PC6-BFS4 presentó una reducción en compresión del 4% en comparación a la mezcla PC8-BFS2.

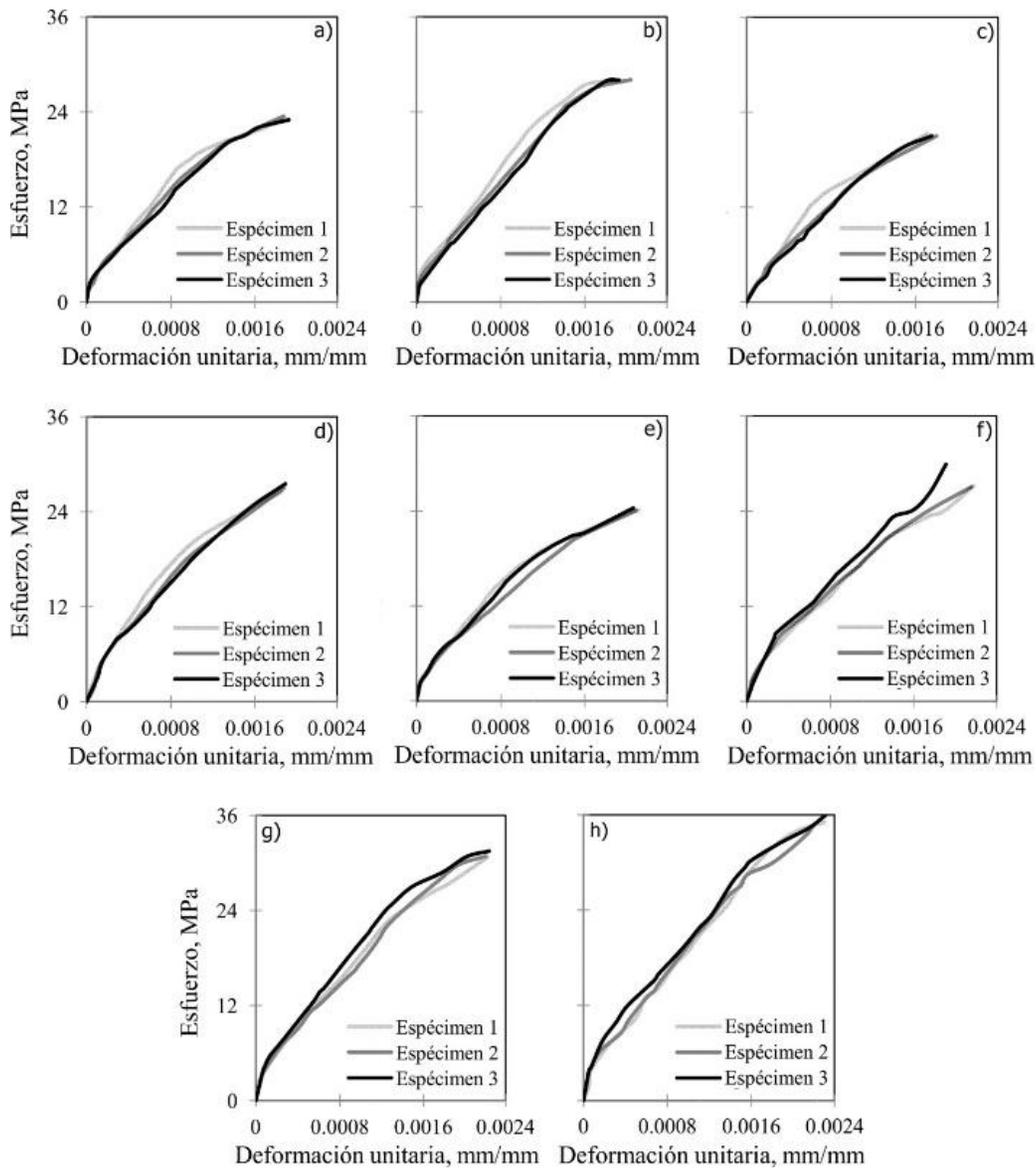


Figura 6. Curvas esfuerzo-deformación unitaria en compresión de las mezclas: a) PC8-FA2, b) PC8-BFS2, c) PC6-FA4, d) PC6-BFS4, e) FA8-BFS2, f) FA6-BFS4, g) FA4-BFS6, h) FA2-BFS8.

De este modo, se concluye que la adición de ceniza volante en el concreto genera las mayores reducciones en compresión para las edades evaluadas (28 y 90 días) y los contenidos de reemplazo empleados (20% y 40%). Ramezaniyanpour y Malhotra [22] afirman que el desarrollo de resistencias de la escoria de alto horno es mucho más rápida que el desarrollo de

resistencias de la ceniza volante en el concreto, lo cual fue evidenciado en esta investigación. Similarmente, Li *et al.* [23] reportaron que se obtienen las mejores resistencias en compresión cuando la ceniza volante en el concreto se encuentra en un intervalo del 25 al 30% y afirman que este hecho es debido a que aun cuando la actividad de la ceniza volante es baja, mayores contenidos de

ceniza volante afectan el desarrollo temprano de las resistencias en compresión. De esta forma, Li *et al.* [23] concluyen que cuando el contenido de ceniza volante es adecuado, aunque su actividad de hidratación es baja a edades tempranas, su efecto de relleno (FILLER) juega un papel importante en el desarrollo de resistencias y en la densidad de estructura de poros del concreto. Por otro lado, Aldea *et al.* [24] evaluaron el efecto de las adiciones de escoria sobre las propiedades mecánicas en compresión, tensión y flexión del concreto, y encontraron que un 25% de reemplazo de escoria es óptimo para la resistencia en compresión, lo cual fue evidenciado en este estudio para el contenido de reemplazo de 20% de escoria.

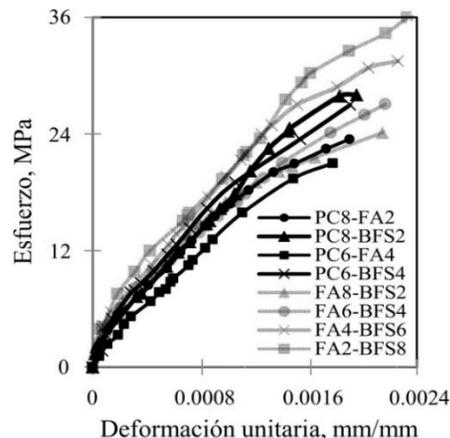


Figura 7. Promedio de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas.

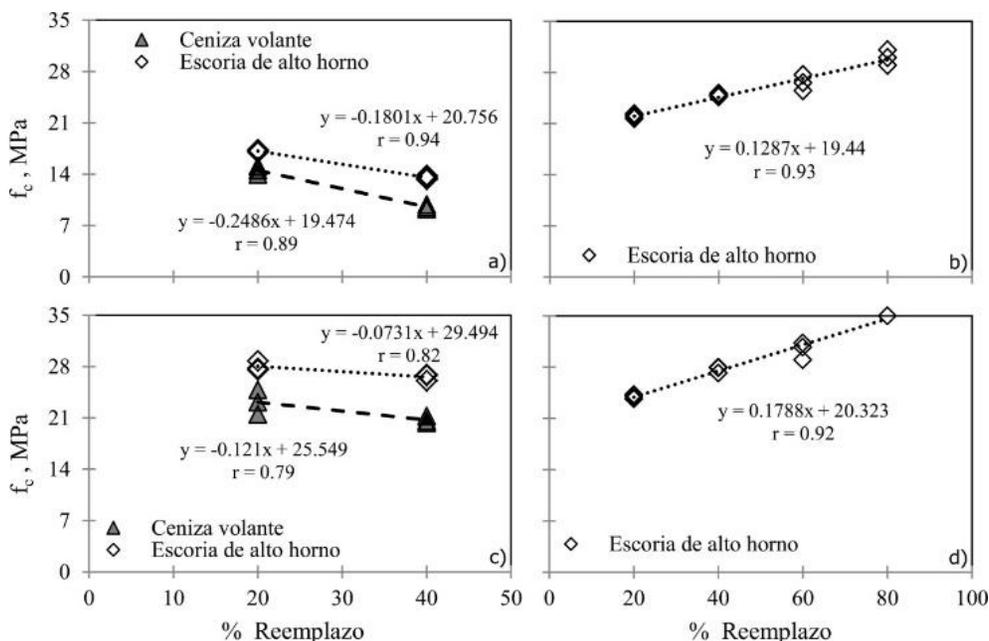


Figura 8. Tendencias obtenidas en compresión: a) mezclas con cemento a 28 días, b) mezclas de activación alcalina a 28 días, c) mezclas con cemento a 90 días, d) mezclas de activación alcalina a 90 días.

Tabla 5. 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
FA8-BFS2	21,94	22,32	21,70	22,01	0,3	24,25	23,69	24,11	24,03	1,0
FA6-BFS4	25,11	24,97	26,45	24,88	1,1	27,99	27,91	27,26	27,19	1,2
FA4-BFS6	26,68	25,48	27,70	26,59	0,2	30,80	31,28	28,99	30,73	3,2
FA2-BFS8	28,97	31,07	29,98	30,02	1,7	35,01	34,89	35,12	35,09	0,3

Aldea *et al.* [24] encontraron que los concretos con 50% de reemplazo de escoria presentan resistencias a compresión ligeramente menores a la mezcla de control (100% cemento), considerando que altos reemplazos de escoria (mayores al 50%) resultan en una reducción considerable del desempeño en compresión del concreto. Guo *et al.* [25] también afirman que la adición de escoria de alto horno en el concreto debe ser menor al 50% por peso total del material cementante, debido a que altos contenidos de escoria de alto horno pueden afectar el desempeño en compresión en estado endurecido a la edad de 28 días. En el presente estudio, aunque no se emplearon contenidos de reemplazo mayores al 40%, se observó que reemplazos mayores al 20% disminuyen la resistencia a compresión del concreto a la edad final evaluada de 90 días.

Asimismo, como se observa en la Tabla 5 y en las Figuras 8a y 8c, se evidenciaron incrementos de resistencia en compresión de 28 a 90 días de edad para las 4 mezclas binarias con cemento, presentándose incrementos de: 64% para la mezcla PC8-FA2, 63% para la mezcla PC8-BFS2, 110% para la mezcla PC6-FA4 y 95% para la mezcla PC6-BFS4. Estos resultados demuestran que a edad de 90 días, el incremento de resistencia en compresión de las mezclas con ceniza volante es mayor al incremento presentado por las mezclas con escoria; es decir, si bien la adición de ceniza volante genera valores de resistencia a compresión menores a los aportados por la escoria en edades de 28 y 90 días, estas mezclas con ceniza volante experimentan la mayor ganancia de resistencia a compresión a edad de 90 días, en comparación con las mezclas de escoria de alto horno. Con base en lo anterior, se puede afirmar que la adición de cenizas volantes al concreto disminuye la resistencia a compresión en edades tempranas, pero puede incrementar dicha propiedad en edades posteriores debido al crecimiento paulatino de su hidratación en función del tiempo. Similarmente, Siddique [6] incorporó grandes volúmenes de ceniza volante Clase F en el concreto en porcentajes de 40, 45% y 50%, y encontró que la resistencia a compresión del concreto disminuye a los 28 días. Sin embargo, el desempeño en compresión de los especímenes exhibió un significativo mejoramiento a la edad de 365 días, y se atribuye el hecho a la reacción puzolánica de la ceniza volante. El efecto de retardo en el desarrollo de las resistencias del concreto por la inclusión de cenizas volantes ha sido observado

previamente en otros estudios. Según Lawrence *et al.* [26], la adición de ceniza volante al concreto puede retardar la hidratación del cemento Portland en edades tempranas debido a la presencia de iones aluminatos o a la materia orgánica disuelta en la fase acuosa, lo cual retrasa la nucleación y la cristalización de los componentes de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y del gel CSH. El Comité ACI (American Concrete Institute) 226 [5] reporta que la actividad puzolánica de la ceniza volante continúa desarrollándose en el tiempo, presentando mejores resistencias mecánicas a edades posteriores cuando el concreto adicionado se encuentra en presencia de humedad. Por su parte, Erdem y Kirca [27] sostienen que las reacciones de hidratación iniciales de la ceniza volante y la escoria de alto horno son más lentas que la presentada por el cemento Portland ordinario, lo cual provoca que el desarrollo de resistencias en estos materiales sea más lento y que se den altas resistencias a edades prolongadas. En este estudio, dichos incrementos de resistencia a compresión a edades posteriores también fueron observados.

En cuanto a las mezclas de activación alcalina, como se observa en la Tabla 5 y en las Figuras 7, 8b y 8d, la resistencia a compresión de los especímenes a edades de 28 y 90 días incrementa linealmente con el aumento del porcentaje de escoria de alto horno; aunque la evolución de las resistencias en compresión de 28 a 90 días no fue significativa, al presentarse incrementos de hasta 14% en sus valores. Como se observa en la Tabla 5, para los resultados en compresión a 90 días, la mezcla FA6-BFS4 presenta una resistencia en compresión de 27,19 MPa, ligeramente menor a la mezcla con cemento PC8-BFS2 de mejor desempeño en compresión, es decir, 27,99 MPa. Sin embargo, la mezcla de composición 40% ceniza volante – 60% escoria de alto horno (FA4-BFS6), con una resistencia en compresión de 30,73 MPa, logró superar la resistencia en compresión de la mezcla PC8-BFS2, al igual que la mezcla FA2-BFS8 con una resistencia en compresión de 35,09 MPa. Por lo tanto, se observó que las mezclas de activación alcalina pueden superar las resistencias en compresión de las mezclas de cemento adicionadas; en este estudio ocurrió cuando los contenidos de escoria son iguales o mayores al 60%. Dicho mejoramiento de propiedades mecánicas para las mezclas de activación alcalina puede deberse a la influencia de los activantes químicos empleados y al

procedimiento de curado efectuado con temperatura, factores que actúan como catalizadores en la reacción química y el temprano desarrollo de las resistencias mecánicas del concreto.

En este estudio fueron calculadas relaciones molares entre los activantes alcalinos y los polvos cementantes utilizados en las mezclas. Estos parámetros representan la relación de óxidos presentes en los materiales ceniza volante-escoria de alto horno y los activantes silicato de sodio e hidróxido de sodio. Los parámetros de relaciones molares principales para cada mezcla se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Relaciones molares resultantes en las mezclas de activación alcalina.

Relación molar	FA8-BFS2	FA6-BFS4	FA4-BFS6	FA2-BFS2
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	1,53	1,70	1,92	2,19
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	4,26	4,34	4,45	4,57
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,36	0,39	0,43	0,48

Como se observa en la Tabla 6, se presentan las relaciones entre los óxidos de sodio, aluminio y silicio de las mezclas de activación alcalina elaboradas. Davidovits [28] propuso intervalos de relaciones molares para las cuales el desempeño de los geopolímeros sería adecuado: $0,2 < \text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 < 0,28$ y $3,5 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4,5$. Similarmente, Kovalchuk *et al.* [28] establecen las relaciones molares de óxidos $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 1$ y $3,5 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4,0$. En el presente trabajo, se observó: (i) para la relación $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, los valores de las 4 mezclas resultaron mayores a 1, lo cual supera el límite propuesto por Kovalchuk *et al.* [29], y en consecuencia según reportan estos autores, pueden presentarse desequilibrios de cargas entre los iones de Aluminio y Sodio (Al^{3+} y Na^+) y sustituciones de Silicio-Aluminio (Si-Al), y provocar menores resistencias mecánicas del concreto; (ii) para la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, se observaron valores dentro del intervalo propuesto por Davidovits [28], para lo cual, el incremento de esta relación aumentó la resistencia a compresión de los especímenes evaluados; (iii) para la relación $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, los valores en las 4 mezclas fueron mayores a 0,28 (Davidovits, [28]), lo cual, pudo haber limitado la resistencia a compresión de los especímenes. En síntesis, aunque las relaciones

molares $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de las mezclas alcalinas fabricadas en este estudio no cumplen con los intervalos propuestos por Kovalchuk *et al.* [29] y Davidovits, [28], la relación $3,5 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4,5$ si se cumplió para las 4 mezclas evaluadas, y se observó que en valores cercanos a 4,5 se presentan las mejores resistencias a compresión. Finalmente, cabe mencionar que para el presente estudio, no se alteró el diseño de mezcla ni las dosificaciones en peso de los activantes (lo cual podría modificar los valores de las relaciones molares y obtener mejores desempeños), sino únicamente se variaron los contenidos de ceniza y escoria a fin de caracterizar el desempeño mecánico de las mezclas de activación alcalina.

Por otra parte, es importante destacar el efecto del contenido de inquemados (ver Tabla 1) sobre el desempeño mecánico de las mezclas fabricadas. Los inquemados presentes en los materiales cementantes representan el porcentaje de partículas procedentes de una combustión incompleta en los procesos de producción. Como se observa en la Tabla 1, el material cementante con mayor contenido de inquemados resultó ser la ceniza volante, con un valor cercano al 8%. Según Bhanumathidas y Kalidas [30], los inquemados en las cenizas volantes pueden absorber fracciones de agua, inhibir el ingreso de aire y desmejorar la fluidez, lo cual aumenta la demanda de aditivos incorporadores de aire y plastificantes en la mezcla de concreto. Kearsley y Wainwright [31] sostienen que altos contenidos de carbón de las cenizas asimismo resultan en bajas resistencias mecánicas del concreto. Estos efectos fueron evidenciados en el presente trabajo: si bien, las propiedades de asentamiento y trabajabilidad son mejoradas por el empleo de cenizas volantes, durante la fabricación de las mezclas fue necesario incrementar las dosificaciones de plastificante en la medida que aumentaban los contenidos de ceniza volante (Tablas 2 y 4), y posteriormente en estado endurecido, los especímenes con altos contenidos de ceniza volante presentaron resistencias a compresión menores a las proporcionadas por los especímenes con escoria (Figura 8). De esta forma, se comprobó que además de la lenta reacción puzolánica, la inclusión de mayores contenidos de agua y plastificante en la mezcla disminuyen las resistencias finales a compresión del concreto, en este estudio evaluadas a 90 días.

3.1.1 Deformación unitaria

Los resultados de los ensayos de deformación unitaria por compresión de las mezclas, ϵ_o , se

muestran en la Tabla 7. Las tendencias obtenidas en deformación unitaria por compresión de la mezclas se muestran en la Figura 9.

Tabla 7. Resultados de deformación unitaria para cada tipo de mezcla.

Identificación	Figura 6	Esp 1	Esp 2	Esp 3	X	CV%
PC8-FA2	a	0,00189	0,00192	0,00195	0,00192	1,2
PC8-BFS2	b	0,00193	0,00195	0,00206	0,00198	2,8
PC6-FA4	c	0,00173	0,00178	0,00182	0,00178	2,2
PC6-BFS4	d	0,00187	0,00189	0,00191	0,00189	1,0
FA8-BFS2	e	0,00208	0,00211	0,00214	0,00211	1,1
FA6-BFS4	f	0,00216	0,00219	0,00197	0,00217	4,4
FA4-BFS6	g	0,00220	0,00222	0,00225	0,00222	0,8
FA2-BFS8	h	0,00225	0,00230	0,00232	0,00229	1,3

Como se observa en la Tabla 7 y en las Figuras 7 y 9a, la mezcla PC6-FA4 presentó una reducción en deformación unitaria del 7% en comparación a la mezcla PC8-FA2, y la mezcla PC6-BFS4 presentó una reducción del 4% en comparación a los valores de la mezcla PC8-BFS2. En consecuencia, se evidencia que los especímenes con cemento presentan reducciones en deformación unitaria por compresión con el aumento de los contenidos de

ceniza volante y escoria de alto horno, en mayor medida para el caso de la ceniza volante. La mezcla con adición 40% de ceniza volante resultó ser la mezcla con cemento de menor capacidad de deformación unitaria, lo que permite afirmar que para el tiempo de 90 días evaluado en este estudio, la adición de ceniza volante reduce la capacidad de deformación unitaria del concreto al volverlo más rígido.

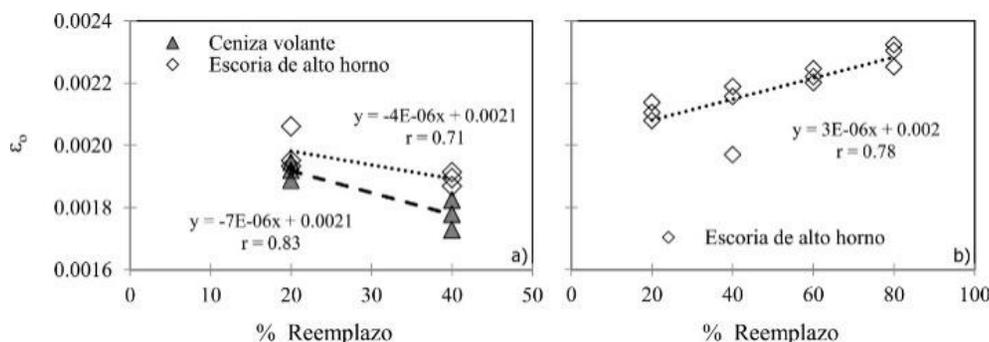


Figura 9. Tendencias obtenidas en deformación unitaria por compresión: a) mezclas con cemento, b) mezclas de activación alcalina.

Para el caso de las mezclas de activación alcalina, como se observa en la Tabla 7 y en las Figuras 7 y 9b, el incremento del porcentaje de escoria en la mezcla aumenta ligeramente la capacidad de deformación unitaria del concreto. Asimismo, todas las mezclas de activación alcalina presentaron deformaciones unitarias por compresión mayores a las presentadas por las mezclas con cemento. Por ejemplo, la mezcla de activación alcalina con menor desempeño en compresión, esto es, FA8-BFS2 presentó un incremento en la deformación unitaria por compresión de 9% en comparación a la mezcla

con cemento de mejor desempeño en compresión PC8-BFS2. Similarmente, la mezcla con dosificación 20% ceniza volante – 80% escoria de alto horno, FA2-BFS8, presentó un incremento de deformación unitaria por compresión de 16% en comparación a la mezcla con cemento de mejor desempeño en compresión, PC8-BFS2. Con base a estos resultados, nótese que las mezclas de activación alcalina pueden presentar valores de deformación unitaria superiores a los valores presentados por las mezclas con cemento adicionadas y al valor tradicional del concreto

simple de 0,002 [32] debido a las resistencias en compresión elevadas que presentan.

3.2 Módulo de elasticidad y relación de Poisson

Los resultados de los ensayos de módulo de

elasticidad, E_c , y relación de Poisson, ν , de las mezclas a edad de 90 días se muestran en la Tabla 8. Las tendencias obtenidas en módulo de elasticidad y relación de Poisson se muestran en las Figuras 10 y 11, respectivamente.

Tabla 8. 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
FA8-BFS2	24429	24689	24104	24407	1,0	0,176	0,176	0,179	0,177	0,8
FA6-BFS4	25738	25651	25812	25734	0,5	0,188	0,180	0,186	0,184	1,8
FA4-BFS6	27663	27995	27453	27704	0,9	0,200	0,203	0,197	0,200	1,3
FA2-BFS8	29736	29650	29915	29767	0,7	0,213	0,209	0,215	0,213	1,3

3.2.1 Módulo de elasticidad

Como se observa en la Tabla 8 y en la Figura 10a, para las mezclas con cemento, el incremento en los porcentajes de reemplazo de ceniza volante y escoria de alto horno reduce los valores de módulo de elasticidad obtenidos. Así, la mezcla PC6-FA4 presentó una reducción en el módulo de elasticidad del 5% en comparación a la mezcla PC8-FA2, y la mezcla PC6-BFS4 presentó una reducción en

compresión del 13% en comparación a la mezcla PC8-BFS2. Para reemplazos del 20%, se observó que la mezcla con escoria de alto horno presentó valores de módulo de elasticidad similares a los proporcionados por la mezcla de ceniza volante; sin embargo, para reemplazos del 40%, el módulo de elasticidad de la mezcla con ceniza volante excedió los valores observados para la mezcla de escoria de alto horno.

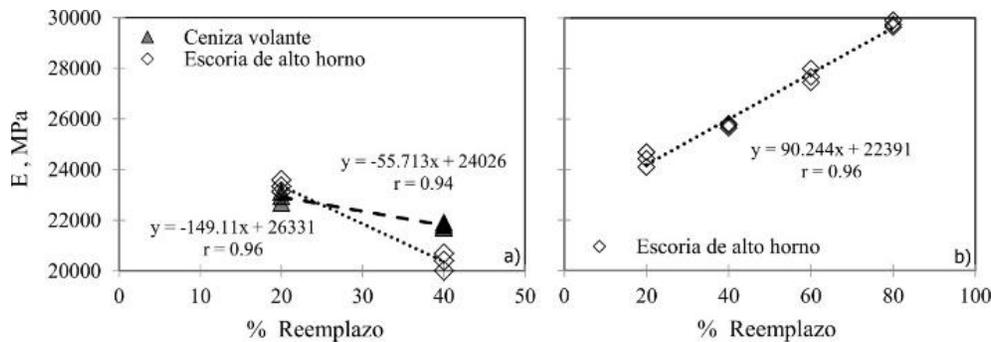


Figura 10. Tendencias obtenidas en módulo de elasticidad: a) mezclas con cemento, b) mezclas de activación alcalina.

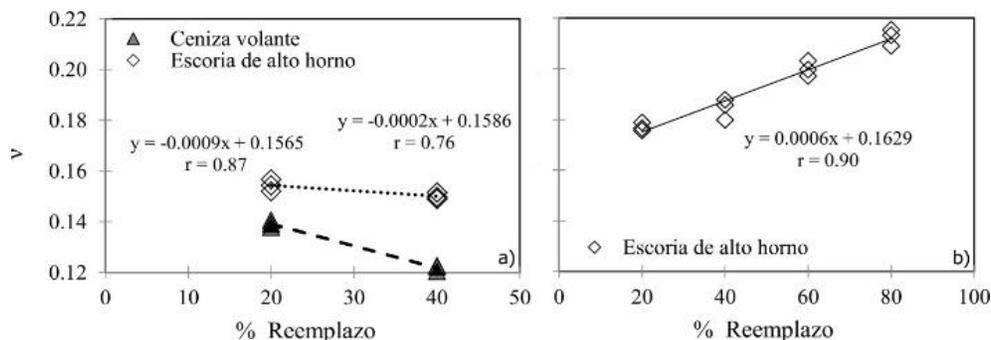


Figura 11. Tendencias obtenidas en relación de Poisson: a) mezclas con cemento, b) mezclas de activación alcalina.

Aunque la escoria de alto horno proporcionó las mayores resistencias a compresión en las mezclas, no proporciona un aumento igual en los valores de módulo de elasticidad por cuanto la forma angular de sus partículas no llenan completamente las porosidades en la matriz: lo contrario se observó para el caso de la ceniza volante, en donde se evidenciaron resistencias a compresión menores, pero mayores valores de módulo de elasticidad a causa de la forma esférica de sus partículas que se acomodan y llenan adecuadamente las porosidades de la matriz. De esta forma, se comprobó que el módulo de elasticidad del concreto demuestra una tendencia al aumento por la adición de grandes contenidos de ceniza volante, y se espera que dicho valor incremente en función del tiempo a causa de la reacción puzolánica de las cenizas generada. Similarmente, Malhotra y Metha [33] sugieren que el módulo de elasticidad del concreto con altos contenidos de ceniza volante puede incrementar debido a la presencia de cantidades considerables de partículas de ceniza sin reaccionar, las cuales actúan como agregado fino y generan una baja porosidad en la zona interfacial de la matriz. Por su parte, Bouzoubaâ *et al.* [34] evaluaron el efecto de las cenizas volantes como adiciones en el concreto para reemplazos del 55% y obtuvieron a 90 días módulos de elasticidad del orden de 40000 MPa, para lo cual concluyen que estos altos valores son debidos a la presencia de partículas esféricas de ceniza volante sin reaccionar que actúan como agregado fino y fortalecen la adherencia interfacial entre la pasta y los agregados. Como se observa de acuerdo a estas previas investigaciones, las cenizas volantes pueden actuar como material de relleno y aumentar la porosidad de la matriz, lo cual incrementa el módulo de elasticidad del concreto. En este sentido, Mindess *et al.* [35] manifiestan que el módulo de elasticidad es significativamente afectado por la porosidad; así, bajas porosidades resultan en altos valores de módulo de elasticidad del concreto. Kuder *et al.* [36] también evidenciaron que el módulo de elasticidad del concreto resulta ser menos sensible al incremento de las adiciones de ceniza volante y escoria de alto horno en comparación con la resistencia a compresión del concreto, y atribuyen el hecho a la reducción en la porosidad a causa de la formación del gel C-S-H de la reacción puzolánica, especialmente a edades posteriores. Este efecto de sensibilidad mencionado por Kuder *et al.* [36] fue observado en el presente estudio, de tal forma que

en función de los contenidos de reemplazo, las variaciones en resistencia a compresión de las mezclas fueron mayores a las variaciones observadas en módulo de elasticidad.

En cuanto a las mezclas de activación alcalina, como se observa en la Tabla 8 y en la Figura 10b, los valores de módulo de elasticidad incrementan linealmente con el aumento en el porcentaje de escoria de alto horno adicionado a las mezclas. Asimismo, todas las mezclas de activación alcalina presentaron módulos de elasticidad mayores a los aportados por las mezclas con cemento. Por ejemplo, la mezcla de activación alcalina con menor desempeño en compresión, esto es, FA8-BFS2 presentó un incremento en módulo de elasticidad de 6% en comparación a la mezcla con cemento de mejor desempeño en compresión PC8-BFS2. Similarmente, la mezcla FA2-BFS8, presentó un incremento módulo de elasticidad de 23% en comparación a la mezcla con cemento de mejor desempeño en compresión, PC8-BFS2. Con base a estos incrementos y a los evidenciados en los resultados de resistencia a compresión (Figura 8d), se puede concluir que el módulo de elasticidad aumenta con el incremento en las resistencias a compresión de estas mezclas. Según Topark *et al.* [37], la resistencia a compresión de los concretos de activación alcalina puede ser correlacionada con el módulo de elasticidad, donde el alto grado de polimerización provoca una matriz densa y altos valores de resistencia a compresión y módulo de elasticidad. Topark *et al.* [37] también reportan que el concreto geopolimérico puede exhibir módulos de elasticidad similares o mayores a los concretos de cemento Portland tradicionales cuando se emplean bajas relaciones de los activantes de silicato de sodio/hidróxido de sodio (SS/SH), lo que resulta en altas cantidades de Na_2O . Dicho efecto también fue observado en el presente estudio, puesto que el empleo de una relación de activantes SS/SH=0.18 provocó módulos de elasticidad mayores a los aportados por las mezclas con cemento. En adición, ha sido reportado que el alto contenido de silicato de sodio puede incrementar la elasticidad del concreto geopolimérico, resultando consecuentemente en valores bajos de módulo de elasticidad, menores a los de los concretos de cemento portland [38].

3.2.2 Relación de Poisson

En la Tabla 8 y en la Figura 11a, se observa para las

mezclas con cemento que el incremento en los contenidos de ceniza volante y escoria de alto horno disminuye los valores de relación de Poisson de los especímenes. Así, la mezcla PC6-FA4 presentó una reducción en relación de Poisson del 12% en comparación a la mezcla PC8-FA2, y la mezcla PC6-BFS4 presentó una reducción en relación de Poisson del 3% en comparación a la mezcla PC8-BFS2. De lo anterior se percibe que la reducción en la relación de Poisson del concreto es más sensible a las adiciones de ceniza volante, en comparación a las adiciones de escoria. Como se muestra en la Figura 11a, los menores valores de relación de Poisson fueron obtenidos para las mezclas con adición de ceniza volante, posiblemente debido a la mayor deformabilidad longitudinal de los compuestos de la hidratación de la ceniza, los cuales se consideran menos estables y rígidos que los obtenidos durante la hidratación del cemento Portland.

Para las mezclas de activación alcalina, como se observa en la Tabla 8 y en la Figura 11b, los valores de relación de Poisson incrementan con el aumento de los porcentajes de escoria adicionados. Esta tendencia es similar a la observada en resistencias a compresión, es decir, a medida que incrementa la resistencia a compresión de estas mezclas alcalinas, también lo hacen sus valores de relación de Poisson. De otro modo, como se observa en la Tabla 7 y en la Figura 11, los valores de relación de Poisson para las mezclas de activación alcalina resultan mayores a los valores de las mezclas con cemento adicionadas. Aldred y Day [39] afirman que la relación de Poisson del concreto geopolimérico se encuentra generalmente en un intervalo de 0.19 a 0.24, y sus valores son ligeramente mayores a los

presentados los concretos de cemento Portland tradicionales. En esta investigación también se encontró que los valores de relación de Poisson de las mezclas de activación alcalina están en el orden de 0.18 a 0.21, lo cual es acorde a lo planteado por Aldred y Day [39].

3.3 Resistencia a la tracción

Los resultados de los ensayos en tracción de las mezclas, f_t , a edad de 90 días, se muestran en la Tabla 9. Las tendencias obtenidas en tracción para cada mezcla se muestran en las Figura 12.

Como se observa en la Tabla 9 y en la Figura 12a, la adición de ceniza volante disminuye en mayor medida la resistencia a la tracción del concreto, en comparación con las adiciones de escoria de alto horno. Así, la mezcla PC6-FA4 presentó una reducción de resistencia a tracción del 15% en comparación a la mezcla PC8-FA2, y la mezcla PC6-BFS4 presentó una reducción de resistencia a tracción del 6% en comparación a la mezcla PC8-BFS2.

Tabla 9. Resultados de resistencia a tracción para cada tipo de mezcla.

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
FA8-BFS2	2,86	2,70	2,61	2,72	3,8
FA6-BFS4	3,25	3,40	3,31	3,32	3,4
FA4-BFS6	3,54	3,50	3,34	3,46	3,3
FA2-BFS8	3,75	3,70	3,80	3,75	2,7

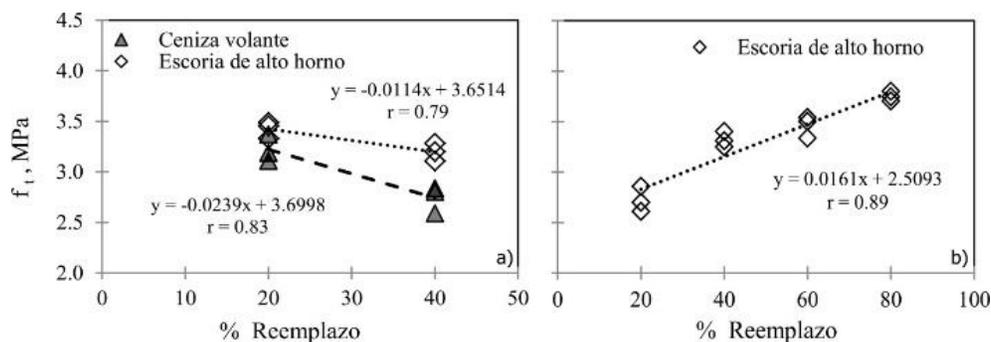


Figura 12. Tendencias obtenidas en tracción: a) mezclas con cemento, b) mezclas de activación alcalina.

De esta forma, se observó que el contenido óptimo de reemplazo resultó ser del 20% para la ceniza volante y la escoria de alto horno. Estos resultados han sido comparados con las experiencias de otros estudios. Por ejemplo, Siddique [6] observó que la resistencia a tracción del concreto disminuyó con el incremento de adiciones de ceniza volante, efecto que igualmente ha sido observado en el presente estudio. De la misma forma, Siddique [6] encontró que la variación en la resistencia a tracción del concreto con contenidos de ceniza volante es similar a la observada en el caso de resistencias a compresión. En el presente estudio también se apreció que el desempeño en tracción de las mezclas variaba de forma similar al desempeño en compresión. En cuanto al efecto de la escoria, Topçu y Boga [40] evaluaron la resistencia a tracción del concreto con adiciones de escoria de alto horno, y encontraron que el contenido de 25% de escoria proporciona las mejoras resistencias a tracción. Aldea *et al.* [24] comprobaron que adiciones del 25% de escoria de alto horno en el concreto presentan resistencias a tracción comparables con los concretos de 100% cemento Portland tradicional, y que las tendencias de las resistencias a tracción son comparables con las tendencias en compresión. Estos efectos también fueron observados en este estudio: aunque no se elaboró una mezcla de control 100% cemento (por tratarse de mezclas binarias), se observó que la adición del 20% de escoria de alto horno presentaba las mayores resistencias a tracción de las mezclas con cemento, al igual que en resistencia a compresión; además se observó que en función de las adiciones, el comportamiento del concreto en compresión variaba de forma similar al comportamiento en tracción.

En relación a las mezclas activadas alcalinamente, como se observa en la Tabla 9 y en la Figura 12b, las resistencias a tracción incrementan con el aumento de la adiciones de escoria en el concreto. La mezcla FA8-BFS2 presenta una resistencia a la tracción de 2,72 MPa, menor a la mezcla con cemento PC8-BFS2 de mejor desempeño en compresión, es decir, 3,22 MPa. Sin embargo, la mezcla de composición 60% ceniza volante – 40% escoria de alto horno (FA6-BFS4), con una resistencia a la tracción de 3,32 MPa, logró superar la resistencia a tracción de la mezcla PC8-BFS2, al

igual que la mezcla FA2-BFS8 con una resistencia a la tracción de 3,75 MPa. Este efecto fue muy parecido a las tendencias observadas en compresión para este tipo de mezclas.

3.4 Módulo de rotura

Los resultados de los ensayos en módulo de rotura de las mezclas, f_r , a edad de 90 días, se muestran en la Tabla 10. Las tendencias obtenidas en módulo de rotura para cada mezcla se muestran en las Figura 13.

Tabla 10. Resultados de módulo de rotura para cada tipo de mezcla.

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
FA8-BFS2	3,09	2,99	3,18	3,08	2,5
FA6-BFS4	3,56	3,70	3,79	3,68	2,5
FA4-BFS6	3,67	3,41	3,38	3,49	3,7
FA2-BFS8	4,08	4,20	4,26	4,18	1,8

Como se observa en la Tabla 10 y en la Figura 13a, el módulo de rotura del concreto disminuye con el incremento de los porcentajes de ceniza volante y escoria del alto horno adicionados, en mayor medida para las adiciones de ceniza volante. Así, la mezcla PC6-FA4 presentó una reducción de módulo de rotura del 10% en comparación a la mezcla PC8-FA2, y la mezcla PC6-BFS4 presentó una reducción de módulo de rotura del 5% en comparación a la mezcla PC8-BFS2. Siddique [6], observó que la resistencia a flexión del concreto disminuyó con el incremento de adiciones de ceniza volante, lo cual también ha sido observado en el presente estudio. En el estudio de Li *et al.* [23], al igual que para los resultados hallados en compresión, se obtuvieron los mejores desempeños en módulo de rotura cuando el contenido de ceniza en la mezcla varió del 25% al 30%. En el presente estudio, se observó que el contenido óptimo tanto para la ceniza volante como para la escoria fue del 20%, presentándose en estos niveles los valores más elevados en módulo de rotura para las mezclas con cemento. No obstante, las adiciones de ceniza volante generan los valores más bajos de módulo de rotura registrados.

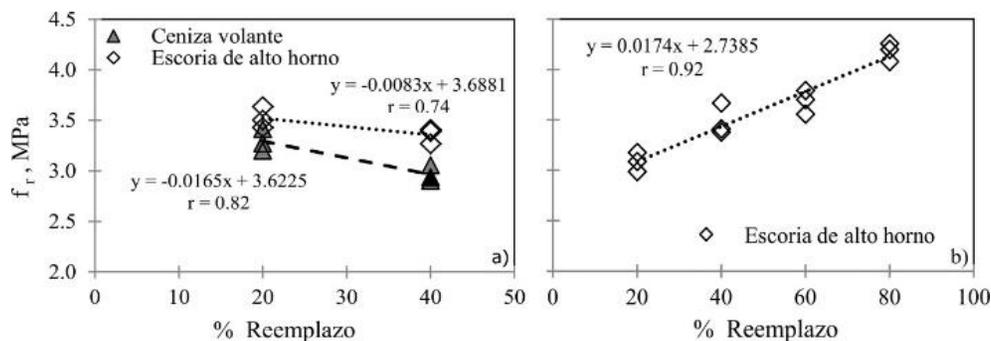


Figura 13. Tendencias obtenidas en módulo de rotura: a) mezclas con cemento, b) mezclas de activación alcalina.

En cuanto a las mezclas de activación alcalina, como se observa en la Tabla 10 y en la Figura 13b, la adición de contenidos de escoria incrementa el módulo de rotura del concreto. La mezcla FA8-BFS2 presenta un módulo de rotura 3,08 MPa, menor a la mezcla con cemento PC8-BFS2 de mejor desempeño en compresión, es decir, 3,29 MPa. Sin embargo, la mezcla de composición 60% ceniza volante – 40% escoria de alto horno (FA6-BFS4), con un módulo de rotura de 3,68 MPa, logró superar la resistencia a tracción de la mezcla PC8-BFS2, al igual que la mezcla FA2-BFS8 con una resistencia a la tracción de 4,18 MPa. Este efecto fue muy parecido a las tendencias observadas en compresión para este tipo de mezclas.

A partir de las tendencias de los resultados medidos,

en la Tabla 11 se proponen modelos de predicción de los parámetros mecánicos para los concretos adicionados con ceniza volante y escoria de alto horno, y los de activación alcalina, y en la Tabla 12 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 0,70 y 0,97; es decir, son cercanos a 1. Lo anterior indica que existe una estrecha relación entre los parámetros observados y los calculados.

Tabla 11. Ecuaciones propuestas para la determinación de las propiedades mecánicas del CRFA.

Propiedad	Ecuación Propuesta	Unidad
Resistencia a compresión	$f_c = [A (\% \text{reemplazo}) + B]$	MPa
	$\varepsilon_o = [A (\% \text{reemplazo}) + B]$	-
Módulo de elasticidad	$E_c = [A (\% \text{reemplazo}) + B]$	MPa
Relación de Poisson	$\nu = [A (\% \text{reemplazo}) + B]$	-
Resistencia a tracción	$f_t = [A (\% \text{reemplazo}) + B]$	MPa
Módulo de Rotura	$f_r = [A (\% \text{reemplazo}) + B]$	MPa

Tabla 12. Constantes de las ecuaciones propuestas para la determinación de las propiedades mecánicas de los concretos.

Parámetro	Tipo de mezcla	Constante		Coeficiente de correlación
		A	B	
f_c 28 días	Adición con ceniza volante	-0,249	19,474	$r = 0,89$
	Adición con escoria de alto horno	-0,180	20,756	$r = 0,94$
	De activación alcalina	0,129	19,440	$r = 0,93$
f_c 90 días	Adición con ceniza volante	-0,121	25,549	$r = 0,79$
	Adición con escoria de alto horno	-0,073	29,494	$r = 0,82$
	De activación alcalina	0,179	20,323	$r = 0,92$
ϵ_o	Adición con ceniza volante	-0,000007	0,0021	$r = 0,83$
	Adición con escoria de alto horno	-0,000004	0,0021	$r = 0,71$
	De activación alcalina	0,000003	0,0020	$r = 0,78$
E_c	Adición con ceniza volante	-55,713	24026	$r = 0,96$
	Adición con escoria de alto horno	-149,110	26331	$r = 0,94$
	De activación alcalina	90,244	22391	$r = 0,96$
ν	Adición con ceniza volante	-0,0009	0,157	$r = 0,87$
	Adición con escoria de alto horno	-0,0002	0,159	$r = 0,76$
	De activación alcalina	0,0006	0,163	$r = 0,90$
f_t	Adición con ceniza volante	-0,0239	3,700	$r = 0,83$
	Adición con escoria de alto horno	-0,0114	3,651	$r = 0,79$
	De activación alcalina	0,0161	2,509	$r = 0,89$
f_r	Adición con ceniza volante	-0,0165	3,622	$r = 0,82$
	Adición con escoria de alto horno	-0,0083	3,688	$r = 0,74$
	De activación alcalina	0,0174	2,738	$r = 0,92$

4. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos realizados, se evaluó el efecto de las adiciones de ceniza volante y escoria de alto horno sobre el desempeño mecánico de sistemas cementantes binarios de concretos adicionados y de activación alcalina, y se proponen ecuaciones que permiten representar dicho comportamiento. Los resultados del estudio permiten concluir lo siguiente:

Los contenidos de reemplazo óptimos de ceniza volante y escoria de alto horno en los concretos con cemento Portland tradicional resultaron ser equivalentes al 20%, nivel para el cual se presentaron los mejores desempeños en compresión, tracción y módulo de rotura de los especímenes evaluados. Adicionalmente, aunque no se emplearon contenidos de reemplazo mayores al

40%, se observó que reemplazos mayores al 20% 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.

La adición de ceniza volante en el concreto genera las mayores reducciones en resistencia a compresión, resistencia a la tracción y módulo de rotura para los niveles de reemplazo empleados de 20% y 40%, en comparación con las adiciones de escoria de alto horno empleadas. Sin embargo se observó que las adiciones de ceniza volante pueden incrementar el desempeño mecánico del concreto a edades posteriores debido al crecimiento paulatino de su hidratación en función del tiempo.

El módulo de elasticidad del concreto demuestra una tendencia al aumento por la adición de grandes contenidos de ceniza volante, y se espera que dicho valor incremente en función del tiempo a causa de

la reacción puzolánica de las cenizas generada. También se evidenció que el módulo de elasticidad del concreto aumenta con el incremento de las resistencias a compresión, tanto para las mezclas adicionadas como para las mezclas de activación alcalina.

La adición de ceniza volante en el concreto genera las mayores reducciones de relación de Poisson, en comparación con las adiciones de escoria de alto horno utilizadas. Los menores valores de relación de Poisson fueron obtenidos para las mezclas con adición de ceniza volante, posiblemente debido al efecto de relleno que proporcionan las partículas de ceniza en la matriz, y que a razón de su geometría esférica y tamaño, aumentan la rigidez del concreto y reducen su deformabilidad. En cuanto a los concretos de activación alcalina, se observó que los valores de relación de Poisson aumentan en función de los contenidos de escoria adicionados.

Las propiedades mecánicas en compresión, tracción y módulo de rotura de los concretos de activación alcalina incrementan en función del contenido de escoria adicionado. Para este estudio, las mezclas de activación alcalina con adiciones iguales o mayores al 40% de escoria de alto horno superaron los desempeños mecánicos de las mezclas con cemento adicionadas; por lo tanto se afirma que el desempeño mecánico de los concretos de activación alcalina puede ser comparable y/o superior al desempeño mecánico de los concretos adicionados con ceniza volante y escoria de alto horno, a causa de los activantes químicos y procedimientos de curado con temperatura empleados los cuales actúan como catalizadores en el desarrollo de resistencias a tempranas edades.

Las ecuaciones propuestas aplican para sistemas binarios de concretos adicionados y de activación alcalina empleando cenizas volantes y escorias de alto horno, con resistencias a compresión a 90 días entre 20 y 35 MPa. No obstante, aunque los resultados pueden variar de acuerdo a la naturaleza de las cenizas y escorias, y al tipo y dosificación de activantes químicos a emplear, dichas ecuaciones ilustran en general el comportamiento de estos concretos en las 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 Automation*, vol. 4, pp. 505-510, 2014.
- [2]. Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., Bahadori, A., "Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 51, pp. 142-161, July 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049.
- [3]. Ishak, S.A., Hashim, H., "Low carbon measures for cement plant – a review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 103, pp. 260-274, September 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.003.
- [4]. Tolhurst L. *Commercial recovery of metals from coal ash –global review*, 1st ed. Oxford (UK): Lucid Briefings, November 2014, p. 112.
- [5]. ACI Committee 226, "The use of fly ash in concrete," American Concrete Institute, Detroit, MI, Tech. Rep. ACI 226.3R-87, 1987. DOI: 10.14359/1612.
- [6]. Siddique, R., "Performance characteristics of high-volume class F fly ash concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 3, pp. 487-493, March 2004. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.09.002.
- [7]. Aperador, W., Mejía de Gutiérrez, R., Bastidas, D.M., "Steel corrosion behaviour in carbonated alkali-activated slag concrete," *Corrosion Science*, vol. 51, no. 9, pp. 2027-2033, September 2009. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.05.033.
- [8]. Islam, M., Patel, R.K., "Thermal activation of basic oxygen furnace slag and evaluation of its fluoride removal efficiency," *Chemical Engineering Journal*, vol. 169, no. 1-3, pp. 68-77, May 2011. DOI: 10.1016/j.cej.2011.02.054.
- [9]. Torres-Carrasco, M., Rodríguez-Puertas, C., Alonso, M., Puertas, F., "Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour," *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 54, no. 2, pp. 45-57, March 2015. DOI:10.1016/j.bsecv.2015.03.004
- [10]. Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., Deveci, H., Erdemir, F., "Paste backfill of high-sulphide mill tailings using alkali-activated blast furnace slag: Effect of activator nature, concentration and slag properties," *Minerals Engineering*, vol. 83, pp.

- 117-127, November 2015. DOI:10.1016/j.mineng.2015.08.022
- [11]. Chanh NV, Trung BD, Tuan DV (2008). Recent research geopolymer concrete. The 3 rd ACF International Conference –ACF/VCA.
- [12]. Rodríguez Martínez E.D. (2009), Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante (Efficiency of alkaline activators based on different silica sources for the production of fly ash geopolymers) (Thesis), Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- [13]. Van Deventer, J.S.J., Provis, J.L., Duxson, P., “Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement,” *Miner. Eng.*, vol. 29, pp. 89-104, March 2012. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.09.009.
- [14]. Hoja técnica de producto Sika Viscocrete 2100. Sika S.A., Bogotá, Colombia, 2014.
- [15]. Ficha de datos de seguridad Panreac lentejas PA-ACS-ISO. PANREAC QUÍMICA S.L.U., Barcelona, España, 2001.
- [16]. Norma ASTM C 31-15, Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field, Vol. 04.02, Filadelfia (EE.UU.): American Society of Testing and Materials (ASTM), 2015.
- [17]. 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.
- [18]. 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.
- [19]. 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.
- [20]. 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.
- [21]. Norma ASTM C 143-15, Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete, Vol. 04.02, Filadelfia (EE.UU.): American Society of Testing and Materials (ASTM), 2015.
- [22]. Ramezani-pour, A.A., Malhotra, V.M., “Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 17, no. 2, pp. 125-133, January 1995. DOI: 10.1016/0958-9465(95)00005-W.
- [23]. Li, D., Shen, J., Chen, Y., Cheng, L., Wu, X., “Study of properties on 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.
- [24]. Aldea, C.M., Young, F., Wang, K., Shah, S.P., “Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement,” *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 3, pp. 465-472, March 2000. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00200-3.
- [25]. Guo, L.P., Sun, W., Zheng, K.R., Chen, H.J., Liu, B., “Study on the flexural fatigue performance and fractal mechanism of concrete with high proportions of ground granulated blast-furnace slag,” *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 2, pp. 242-250, February 2007. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.11.009.
- [26]. Lawrence, P., Cyr, M., Ringot, E., “Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short-term hydration,” *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 12, pp. 1939-1947, December 2003. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00183-2.
- [27]. Erdem, T.K., Kirca, O., “Use of binary and ternary blends in high strength concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 7, pp. 1477-1483, July 2008. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.026.
- [28]. Davidovits, J. Mineral polymers and methods of making them. United States Patent: 4,349,386. USA, 1982.
- [29]. Kovalchuk, G., Fernández-Jimenez, A., Palomo, A., “Activación alcalina de cenizas volantes. Relación entre el desarrollo mecánico resistente y la composición química de la ceniza,” *Materiales de Construcción*, vol. 58, no. 291, pp. 35-52, Julio 2008. DOI: 10.3989/mc.2008.v58.i291.101.
- [30]. Bhanumathidas, N., Kalidas, N., “Fly ash: The resource of construction industry,” *The Indian Concrete Journal*, vol. 77, no. 4, pp. 997-1004, April 2003.
- [31]. Kearsley, E.P., Wainwright, P.J., “The effect of fly ash properties on concrete strength,” *Journal of the South African Institute of Civil Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 19-26, April 2003.
- [32]. CEB-FIP, “CEB-FIP Model Code 1990 Design Code,” Comité Euro-International du Béton, p.

- 461, 1993.
- [33]. Malhotra, V.M., Metha, P.K., "High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete," Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, Inc. Ottawa, Canada, p. 101, 2002.
- [34]. Bouzoubaâ, N., Zhang, M.H., Malhotra, V.M., "Laboratory-produced high-volume fly ash blended cements: compressive strength and resistance to the chloride-ion penetration of concrete," Cement and Concrete Research, vol. 30, no. 7, pp. 1037-1046, July 2000. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00299-4.
- [35]. Mindess, S., Young, F.J., Darwin, D. Concrete. 2nd ed. Upper Saddle River (EUA): Prentice Hall, 2003. p. 644.
- [36]. Kuder, K., Lehman, D., Berman, J., Hannesson, G. Shogren, R., "Mechanical properties of self consolidating concrete blended with high volumes of fly ash and slag," Construction and Building Materials, vol. 34, pp. 285-295, September 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.034
- [37]. Topark-Ngarm P., Chindaprasirt, P., Sata, V., "Setting time, strength and bond of high calcium fly ash geopolymer concrete," J Mater Civ. Eng., vol. 27, no. 7, 04014198, July 2015.
- [38]. Olivia, M., Nikraz, H., "Properties of fly ash geopolymer concrete designed by taguchi method," Materials & Design, vol. 36, pp. 191-198, April 2012. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.10.036.
- [39]. Aldred, J., Day, J., "Is geopolymer concrete a suitable alternative to traditional concrete?". En: Proceedings del 37th Conference on Our World in Concrete & Structures. Singapore: CI Premier, 2012 p. 14.
- [40]. Topçu, I.B., Boga, A.R. "Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete," Materials & Design, vol. 31, no. 7, pp. 3358-65, 2010. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.01.057.