

COMPOSICIÓN DE MICRO-CONCRETO BASE CEMENTO ACTIVADO ALCALINAMENTE DE ALTA ADHERENCIA

CAMPO TÉCNICO

5

La presente divulgación se encuentra en el campo de los materiales, en particular en el campo de los materiales de construcción y está relacionada con la producción de micro-concretos base cemento activado alcalinamente, que presentan propiedades mecánicas mejoradas, especialmente la adherencia.

10

DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DE LA TÉCNICA

15

El cemento Portland (CP) se define como un conglomerante hidráulico. Se fabrica a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas alrededor de 1450 °C para formar Clinker, el cual posteriormente es molido en presencia de yeso y normalmente adiciones minerales para formar el CP. El cemento mezclado con agregados pétreos (grava y arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y endurece, adquiriendo consistencia pétreo, denominada concreto u hormigón. Su uso está muy generalizado en la construcción y la ingeniería civil.

20

25

El concreto armado se forma al unir el concreto con el acero de refuerzo. Cuando estos dos materiales se ponen en contacto se genera el fenómeno de adherencia entre la matriz de concreto y la matriz del acero. La adherencia es la encargada de la estabilidad estructural generando una adecuada transmisión de cargas y permitiendo una misma deformación para ambos materiales. Una buena adherencia permite la interacción entre la matriz de concreto y la matriz de acero, disipando los esfuerzos adecuadamente sin afectar los estados límites y las cargas de servicio/trabajo.

30

En la búsqueda de disminuir el impacto ambiental y tener materiales alternativos por parte de la industria de la construcción y la comunidad científica, surgen los cementos activados alcalinamente como una propuesta de material cementante en aquellas actividades donde su uso sea recurrente, como es en la fabricación de concretos. Este tipo de concreto

presenta buenas propiedades mecánicas y de durabilidad en comparación con cementos tradicionales como el cemento Portland, propiedades tales como bajos calores de hidratación, elevadas prestaciones mecánicas y buena durabilidad frente a diferentes ataques químicos y físicos, además no requerir en su elaboración de elevados consumos energéticos (temperaturas inferiores a 100 °C).

Los cementos activados alcalinamente (AAC, por su sigla en inglés de *Alkaline activated cements*), corresponden al material primario para la fabricación de los concretos activados alcalinamente con base en ceniza volante. Es conocido que los concretos activados alcalinamente con base en ceniza volante presentan buenas propiedades mecánicas y de durabilidad. Sin embargo, pese a que están ampliamente estudiadas sus propiedades tecnológicas y reológicas poco se conoce sobre los efectos que pueden tener diferentes proporciones de sus componentes en los fenómenos de adherencia o la relación de adherencia-matriz circundante de concreto a la barra de refuerzo.

Por ejemplo, las patentes US9902650B2 y WO2006120201A1 hacen referencia a cementos activados alcalinamente en donde se señala la importancia de la presencia de silicio y aluminio en forma de sílice y alúmina en las cenizas volantes. Sin embargo, no se hace una mención del efecto que tendrían diferentes proporciones de dichos componentes.

De manera similar los artículos “*Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones*” de Fernández-Jiménez *et al* y “*La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros*” de Torres-Carrasco *et al* se limitan a realizar un resumen de las propiedades tecnológicas y reológicas de los materiales cementantes elaborados por activación alcalina de aluminosilicatos.

Si bien en el estado de la técnica se enseña la funcionalidad y las ventajas técnicas de los materiales cementantes elaborados por activación alcalina de aluminosilicatos, no se han abordado los fenómenos de adherencia o la relación de adherencia-matriz circundante de concreto a la barra de refuerzo en función de la relación de la sílice y la alúmina reactiva.

BREVE DESCRIPCIÓN

La presente divulgación hace referencia a una composición de micro-concreto base cemento activado alcalinamente (AAMH) que comprende una pasta cementante que
5 consiste en una mezcla de ceniza volante y activadores alcalinos y agregados pétreos, con propiedades mecánicas mejoradas. En el desarrollo de la composición que se describe, se ha encontrado sorprendentemente que variaciones en la relación de sílice:alúmina en la pasta cementante tienen un efecto en las propiedades del micro-concreto activado alcalinamente, particularmente en la adherencia con el acero, la cual mejora
10 independientemente del espesor de la matriz circundante, a diferencia de lo que se plantea para los concretos convencionales.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

15 **FIG. 1** Composición mineralógica de la ceniza volante de carbón y el hidróxido de calcio determinado por Difracción de Rayos X (DRX).

FIG. 2 Curva Granulométrica

20 **FIG. 3** Distribución de tamaño de partícula de la ceniza volante de carbón y el hidróxido de calcio.

FIG. 4 Resultados de los ensayos *Pull-out*, para CP-control

25 **FIG. 5.** Resultados de los ensayos *Pull-out*, para AAMH. **A.** AAMH1; **B.** AAMH2; **C.** AAMH3

FIG. 6 Comportamiento de la fuerza de tracción entre la matriz de acero y la matriz de micro-concreto de las diferentes mezclas. **A.** 2 días; **B.** 7 días; **C.** 14 días; **D.**
30 28 días

FIG. 7 Resultados de los ensayos de *Pull-out*, en función de la matriz circundante.
A. 2 días; **B.** 7 días; **C.** 14 días; **D.** 28 días

FIG. 8 Resultados de los ensayos de resistencia a compresión

FIG. 9 Correlación de los ensayos de compresión porosidad por petrografía y tracción

DESCRIPCIÓN DETALLADA

Para propósitos de interpretar esta descripción, se aplicarán las siguientes definiciones y cuando sea apropiado, los términos utilizados en forma singular también incluirán la forma plural. Los términos utilizados en la descripción tienen los significados que normalmente se les da en el campo técnico a menos que esta descripción o el contexto indiquen claramente lo contrario.

El presente desarrollo corresponde a una composición de micro-concreto activado alcalinamente base ceniza volante (a partir de aquí AAMH) que comprende una pasta cementante que consiste en una mezcla de ceniza volante, activadores alcalinos y agregados pétreos, en donde la relación de sílice:alúmina en la pasta cementante está entre 3,0 y 6,0.

Para efectos de la presente divulgación, se entiende como *pasta cementante* al producto de reacción de la ceniza volante (sola o en una mezcla de elementos sólidos) y los activadores alcalinos.

La *ceniza volante* corresponde a un subproducto de la quema de carbón, compuesta principalmente por óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio en estado vítreo en su mayor proporción. Su clasificación depende de la concentración de los óxidos que posea de acuerdo con la ASTM C618. Para efectos de la presente divulgación, la ceniza volante es un polvo heterogéneo con morfología esférica, compuesta principalmente por óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio. Para su uso como cementante se recomienda que la

ceniza volante tenga un porcentaje de inquemados menor al 5 %, un contenido de óxido de hierro inferior al 10 %, un contenido de sílice reactiva entre 40 % y el 50 %, un porcentaje de partículas con tamaño inferior a 45 μm mayor al 80 % y un alto contenido en fase vítrea.

5

La ceniza volante para efectos de la presente divulgación tiene un porcentaje de sílice reactiva entre 40 y 45%, un contenido de fase vítrea entre 60 y 70%, alúmina reactiva entre 20 y 25%, una superficie específica entre 450 y 500 m^2/kg con una densidad entre 2000 y 2200 kg/m^3 .

10

Los *activadores alcalinos* normalmente suelen ser sales alcalinas o soluciones cáusticas. Se clasifican, sin limitarse, en: disoluciones cáusticas, sales ligeramente ácidas no silícicas, silicatos, aluminatos, aluminosilicatos, sales fuertemente ácidas no silícicas, entre otros.

15

En una modalidad los activadores alcalinos comprenden hidróxido de sodio y silicato de sodio (*water glass*). En una modalidad particular los activadores alcalinos comprenden además hidróxido de calcio.

20

Para efectos de la presente divulgación el hidróxido de calcio es producto de la hidratación del óxido de calcio de rocas carbonatadas sometidas a calcinación. Es posible que el hidróxido de calcio en presencia de aluminosilicatos y agua genere un material cementante. En una modalidad particular se emplea hidróxido de calcio industrial con un grado de pureza no menor al 95 %.

25

En una modalidad la pasta cementante se forma a partir de una solución activadora alcalina que está compuesta por los activadores alcalinos en una proporción entre 5,2 % y 6,6 % de hidróxido de sodio y entre 3,5 % y 5,2 % de silicato de sodio y agua, mientras que el sólido está compuesto por la ceniza volante en un rango entre 22 % y

30

23 % y el hidróxido de calcio en un rango entre 2,0 % y 3,0 %.

En una modalidad la pasta cementante se forma a partir de la mezcla de los activadores alcalinos en un rango entre 1,0 y 10,0 % p/p o entre 2,0 y 5,0 % p/p, o entre 2,5 y 3,5 % p/p de la composición y la ceniza volante en un rango entre 20 y 25 % p/p o entre 21 y 24 % p/p o de 22 % y 23 % p/p de la composición.

5

En una modalidad la relación sílice:alúmina en la pasta cementante está entre 3,0 y 6,0. En modalidades particulares la relación sílice:alúmina es de 3,06, 4,06 o 5,06.

10 Los *agregados pétreos* corresponden a materiales granulares sólidos inertes y con granulometrías adecuadas. Para efectos de la presente divulgación, los agregados pétreos pueden seleccionarse, sin limitarse a 60 % p/p, 65 % p/p. En una modalidad particular el agregado pétreo es arenón en un rango entre a 50 a 70 % p/p o 60 a 70 % p/p. En una modalidad particular el arenón está en un 65 % p/p de la composición.

15 En una modalidad particular el agregado tiene un porcentaje de humedad del 4,4 %, un módulo de finura del 3,2, una densidad seca de 2716 kg/m³, una densidad saturada de 1636 kg/m³ y una Masa Unitaria Suelta (MUS) de 1676 kg/m³ y una Masa Unitaria Compacta (MUC) de 1676 kg/m³.

20 La presente divulgación será presentada en detalle a través de los siguientes ejemplos, los cuales son suministrados solamente con propósitos ilustrativos y no con el objetivo de limitar su alcance.

EJEMPLOS

25

Ejemplo 1. Composiciones de AAMH

Se elaboraron las composiciones que se ilustran en la Tabla 1 a continuación:

30

Tabla 1. Composiciones elaboradas

Componentes (p/p)			Composiciones		
			AAMH1	AAMH2	AAMH3
Cementante	Ceniza Volante	25 %	22 %	23 %	23 %
	Ca(OH) ₂		3%	2%	2 %
Activador	NaOH	3 %	3%	1,8 %	1,2%
	Na ₂ SiO ₃		0 %	1,2 %	1,7%
Agua	Agua NaOH	7 %	7%	4 %	3,5%
	Agua Na ₂ SiO ₃		0 %	3 %	4%
Agregado	Arenón	65 %	65%	65%	65%
Relación sílice:alumina			3,06	4,06	5,06

Ejemplo 2. Composición química de la ceniza volante y del hidróxido de calcio

5

La composición química de la ceniza volante de carbón y del hidróxido de calcio fue determinada por Fluorescencia de rayos X (FRX). Los resultados se observan en la Tabla 2 a continuación:

10 Tabla 2. Composición química de la ceniza volante de carbón y el hidróxido de calcio determinado por FRX. Porcentajes de óxidos en masa.

Componente/ óxido	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Pérdidas por ignición
Ceniza volante	55,26	26,95	1	5,66	1,78	0,44	0,75	2,28	4,37
Hidróxido de calcio	0,19	0,08	99,14	0,10	0,50	--	--	--	26,6

15 El área superficial específica de la ceniza volante fue de 490,95 m²/kg con una densidad de 2160 kg/m³. De forma adicional se determinó que el tamaño de partícula de la ceniza volante presenta un d₅₀ = 30 μm y para el hidróxido de calcio se observa un d₉₀ = 23 μm, con lo cual se pudo concluir que el material es de tamaño muy fino.

El porcentaje de sílice reactiva en la ceniza volante antes caracterizada fue de 42,20 % con un contenido de fase vítrea de 65,71 %, mientras que la cantidad de alúmina reactiva fue de 22,54 %. Estos valores indican que la ceniza volante de carbón presenta buenas características para ser activada alcalinamente.

Se determinó la composición mineralógica para la ceniza volante de carbón y el hidróxido de calcio por difracción de rayos X (DRX). En lo que respecta a la ceniza volante se observa un bajo grado de cristalinidad entre valores de 2θ de 20 a 40° y tres fases cristalinas, mullita (M), cuarzo (Q) y hematita (H). Para el hidróxido de calcio se observa la presencia de portlandita (P) y carbonato de calcio (T). Los resultados se observan en la Figura 1.

Ejemplo 3. Caracterización del agregado

Tamaño de partícula

El agregado fue sometido al ensayo de granulometría de acuerdo con la norma ASTM C-136-2001. Como conclusión se observó que el material presenta variedad en el tamaño de grano. Se retiene en mayor medida en los tamices número 4, 8 y 16. También presenta un módulo de finura de 3,2. Adicionalmente se evaluaron los parámetros de acuerdo con la normatividad vigente para los agregados finos, así: la masa unitaria compactada del agregado fino (ASTM C-29- 17a), densidad aparentemente seca, absorción del agregado fino (ASTM C-128) y humedad natural del agregado fino (ASTM C-566-19).

Los resultados más relevantes se observan en las Tablas 3 y 4 y en las Figuras 2 y 3.

Tabla 3. Granulometría del agregado

TAMIZ		Retenido (g)	Pasa Max (%)	Pasa (%)	Pasa Min (%)
mm	pulg				
9,51	3/8"	0	100	100	100
4,76	No 4	132,3	90	86	70
2,38	No 8	227,2	70	62	45
1,19	No 16	164,7	53	45	30
0,595	No 30	103	40	34	20
0,297	No 50	66,9	30	28	13
0,149	No 100	59,5	20	21	7
Fondo		82			
P. Inicial		957,5			
P. Final		835,6			

- 5 De acuerdo con los resultados de la granulometría, y el tamaño de partícula del agregado este se clasifica como un arenón según ASTM C136/C136M-19, ya que se retiene en mayor medida en los tamices número 4, 8 y 16. Por lo tanto, se puede afirmar que la condición de las mezclas es la de un micro-concreto base ceniza volante.

10 Tabla 4. Características del agregado

% de humedad	4,4
% de pasa 200	12,7
Módulo de finura	3,2
Color orgánico	1
Densidad seca (kg/m ³)	2716
Densidad Saturada Superficialmente Seca(kg/m ³)	2736
M.U.S. (kg/m ³)	1676

M.U.C. (kg/m ³)	1911
-----------------------------	------

Ejemplo 4. Elaboración de las muestras para ensayos

Se realizaron los ensayos con muestras de control que corresponden a micro-concreto base cemento Portland (a partir de aquí CP-control) y las muestras de estudio que corresponden a los AAMH.

El CP-control está compuesto por cemento estructural (24 %), agua al 11 % y agregados pétreos al 65 %.

Para las muestras de control solo se varió el espesor de la matriz circundante, mientras que para las muestras de estudio se varió el espesor de la matriz circundante y la relación sílice:alúmina.

Las composiciones de AAMH presentan una relación de solución activadora alcalina: sólido de 0,4, donde la solución activadora alcalina está compuesta por los activadores alcalinos y agua, mientras que el sólido está compuesto por la ceniza volante y el hidróxido de calcio. Tanto para el control como para las muestras de estudio el agregado ocupó el 65 % del volumen.

Las muestras de micro-concreto para los ensayos se fabricaron de la siguiente manera:

- se vació la composición en cilindros con diámetro de 38,1 mm y 50,8 mm con una barra de acero de diámetro de 6,4 mm y de 160 mm de longitud de los cuales 60 mm se encuentran embebidos en el cilindro;
- se fraguaron en un horno por un periodo de 24 horas a una temperatura constante de 80 °C;
- se dejaron enfriar en cámara de curado para evitar pérdida de humedad y manteniendo una temperatura constante de 25 °C.

Ejemplo 5. Ensayos de asentamiento

Se realizó una comparación entre un CP-control y las composiciones de AAMH. Se determinó el asentamiento tal y como se demuestra en la Tabla 5, en donde se emplea la siguiente nomenclatura de las muestras.

5 Muestra Control: XD-OPC-XX

en donde:

- X Día de curado en el que se le realiza el ensayo.
D Día.
OPC Micro-concreto base cemento Portland ordinario.
10 XX El espesor de la matriz Circundante

Muestra AAMH base ceniza volante: XD-AAMHXX-YYY

en donde:

- 15 X Día de curado en el que se le realiza el ensayo.
D Día.
AAMH Micro-concreto activado alcalinamente, base ceniza volante.
XX Relación Sílice-Alúmina.
YYY Espesor de la matriz Circundante.

20 **Tabla 5.** Asentamiento en los AAMH y CP-control

COMPOSICIONES			Asentamiento de la mezcla (mm)
Muestra CP-control	Micro-Concreto Base	2D-OPC-31,7 mm	51 mm
		7D-OPC-31,7 mm	
		14D-OPC-31,7 mm	
		28D-OPC-31,7 mm	
		2D-OPC-44,4 mm	
		7D-OPC-44,4 mm	
		14D-OPC-44,4 mm	
		28D-OPC-44,4 mm	
Relación Sílice - Alúmina 3,06 (1)	Micro-Concreto Base ceniza volante	2D-AAMH1-31,7 mm	72 mm
		7D-AAMH1-31,7 mm	
		14D-AAMH1-31,7 mm	
		28D-AAMH1-31,7 mm	
		2D-AAMH1-44,4 mm	

		7D-AAMH1-44,4 mm	
		14D-AAMH1-44,4 mm	
		28D-AAMH1-44,4 mm	
Relación Sílice - Alúmina 4,06 (2)	Micro- Concreto Base ceniza volante	2D-AAMH2-31,7 mm	57 mm
		7D-AAMH2-31,7 mm	
		14D-AAMH2-31,7 mm	
		28D-AAMH2-31,7 mm	
		2D-AAMH2-44,4 mm	
		7D-AAMH2-44,4 mm	
		14D-AAMH2-44,4 mm	
		28D-AAMH2-44,4 mm	
Relación Sílice - Alúmina 5,06 (3)	Micro- Concreto Base ceniza volante	2D-AAMH3-31,7 mm	42 mm
		7D-AAMH3-31,7 mm	
		14D-AAMH3-31,7 mm	
		28D-AAMH3-31,7 mm	
		2D-AAMH3-44,4 mm	
		7D-AAMH3-44,4 mm	
		14D-AAMH3-44,4 mm	
		28D-AAMH3-44,4 mm	

Se observa que la muestra AAMH1 presenta el mayor asentamiento con un valor de 72 mm, mientras que la muestra AAMH2, presentan un asentamiento de 57 mm, siendo aproximadamente igual a la de la muestra control, con un asentamiento de 51 mm.

5

El asentamiento de los AAMH base ceniza volante, está en función de la relación sílice: alúmina. De lo anterior se puede concluir que a medida que se aumenta la relación se disminuye el asentamiento de la mezcla, por tanto, el bajo asentamiento se relaciona con un aumento en la viscosidad de la mezcla por una mayor presencia de silicio.

10

Ejemplo 6. Ensayos de tracción arrancamiento (*Pull-out*) con respecto a la relación sílice:alúmina

CP-control. La Figura 4 corresponde a los resultados de los ensayos de *Pull-out* a los 2, 7, 14 y 28 días para la muestra de CP-control. Se observa que la muestra CP-control presenta baja resistencia en los primeros 7 días y no genera un aumento significativo en la resistencia en el mismo periodo de tiempo como se puede ver en las gráficas de las muestras de control de espesores 31,7 mm y 44,4 mm, particularmente a

los 2 días alcanza el 5,7 % de la resistencia a tracción máxima alcanzada a los 28 días, a los 7 días aumenta al 8,6 % a los 14 días aumenta el 71,4%.

Micro-concretos de cementos activados alcalinamente base ceniza volante. La

Figura 5 corresponde a los resultados de los ensayos de *Pull-out* a los 2, 7, 14 y 28 días para las muestras AAMH. Para la composición AAMH1, la relación de sílice:alúmina corresponde a 3,06. Para la muestra del AAMH1 de espesor 31,7 mm se observa que la resistencia máxima al desprendimiento por la matriz de acero a los 2 días es de 0,01 MPa alcanzando a los 28 días 0,3 MPa. A los 2 días inicia ganando el 3,3 % de la resistencia a tracción máxima a 28 días, a los 7 días aumenta el 20 % y a los 14 días aumenta el 43,4 %. Para el espesor 44,4 mm alcanza una resistencia máxima a 2 días de 0,03 MPa y a los 28 días de 0,6 MPa. Iniciando a los 2 días con una tasa de ganancia en resistencia de 5 % de la resistencia a tracción máxima a 28 días, a los 7 días aumenta el 11,7 % y a los 14 días aumenta el 50 %.

Como se observa en la Figura 5A, los valores de tracción de arrancamiento de AAMH1 base ceniza volante no lograron alcanzar los resultados presentados por el micro-concreto base CP-control. En conclusión, esta mezcla de micro-concreto no alcanza la resistencia de la muestra control a ninguna edad de ensayo.

Para la composición AAMH2 la relación sílice:alúmina es de 4,06 o su equivalente silicato de sodio:hidróxido de sodio de 0,53. Para la muestra de espesor 31,7 mm se observa que la resistencia máxima al desprendimiento por la matriz de acero a los 2 días es de 0,06 MPa alcanzando a los 28 días 0,7 MPa. A los 2 días inicia ganando el 8,6 % de la resistencia a tracción máxima a 28 días, a los 7 días aumenta el 43,3 % y a los 14 días aumenta el 42,8 %. Para el espesor 44,4 mm alcanza una resistencia máxima a 2 días de 0,08 MPa y a los 28 días de 1,0 MPa. A los 2 días inicia ganando el 8 % de la resistencia a tracción máxima a 28 días, a los 7 días aumenta el 42 % y a los 14 días aumenta el 40 %.

En la Figura 5B se evidencian los resultados del ensayo a tracción de la composición AAMH2. El comportamiento de esta composición se asemeja al de la muestra control,

excepto a edades tempranas (2 y 7 días) donde la resistencia es mayor. Todos los AAHM2 estudiados evidencian que tienen una tasa en ganancia de resistencia mayor a la composición control y la composición AAHM1, es decir, que la presencia del silicato de sodio aceleró la tasa en ganancia de resistencia a la tracción máxima.

5

Para la composición AAMH3 la relación sílice:alúmina es de 5,06 o su equivalente silicato de sodio:hidróxido de sodio de 1,06. Para muestra del AAMH3 de espesor 31,7 mm se puede ver que la resistencia máxima al desprendimiento por la matriz de acero a los 2 días es de 0,1 MPa alcanzando a los 28 días 1,6 MPa. Para el espesor 44,4 mm alcanza una resistencia máxima a 2 días de 0,3 MPa y a los 28 días de 1,7 MPa. También se puede observar que al igual que las otras mezclas (AAMH1 y AAMH2) presenta una ganancia en la resistencia máxima considerable en los primeros 14 días, de aquí en adelante la ganancia en resistencia aumenta a una menor velocidad. Datos que pueden ser corroborados en la Figura 5C.

15

Adicionalmente, en la Figura 6 se observa el comportamiento de la fuerza de tracción entre la matriz de acero y la matriz de micro-concreto de las diferentes mezclas incluyendo la muestra control a los 2, 7, 14 y 28 días de ensayo. Los resultados muestran una tasa de ganancia en resistencia mayor para AAMH2 y AAMH3 base ceniza volante con respecto a la muestra control a los 2 días. La muestra AAMH3 presenta una mayor resistencia a la tracción que todas las muestras y también se observa que la muestra CP-control presenta un comportamiento mecánico menor que la muestra AAMH2, al séptimo día del estudio. En el periodo de curado a los 14 días la muestra AAMH3 sigue presentando la mayor resistencia máxima a la tracción. La muestra CP-control a los 14 días ya iguala la resistencia mecánica a tracción de la muestra AAMH2. Finalmente, a los 28 días todas las muestras AAMH aumentan la resistencia a la tracción más rápidamente en relación a los 14 días previos, pero posteriormente la ganancia de resistencia no es significativa.

20

25

30

Ejemplo 7. Ensayos de tracción arrancamiento (*Pull-out*) con respecto a la matriz circundante

Se realizó el ensayo de tracción bajo la norma ASTM C900-15. Para cada una de las muestras en cada periodo del tiempo de curado se evaluaron los dos niveles del espesor de la matriz circundante con la adherencia máxima alcanzada. En la Figura 7A se observan los valores de tracción máximos alcanzados por cada una de las muestras a los 2 días en función de los espesores de la matriz circundante. En la muestra de micro-concreto base CP-control, cuando se cambia de espesor de matriz circundante se genera un aumento de resistencia máxima a la tracción de 33,3 %, al igual en la muestra AAMH1. Para la muestra AAMH2 este aumento corresponde al 25 %, mientras que para la muestra AAMH3 se logra observar un cambio de aproximadamente del 66,7 %; evidenciándose que existe un aumento directamente proporcional al espesor de la matriz circundante y la resistencia a la tracción en todas las muestras para 2 días de curado, aumento que ocurre en mayor medida para la muestra AAMH3.

De manera similar en la Figura 7B se observan los valores de tracción máximos alcanzados por cada una de las muestras a los 7 días. La muestra CP-control en el cambio de espesor de 31,7 mm a 44,4 mm de la matriz circundante se genera un aumento 66,7% siendo mayor que la presentada a los 2 días. En las muestras AAMH1, AMH2 en el cambio de espesor de la matriz circundante genera un aumento de la resistencia máxima a tracción del 30% y el 40%, respectivamente. Para la muestra AAMH3 se observa la misma resistencia a tracción máxima independiente del espesor de la matriz circundante. Los valores de tracción máximos alcanzados por cada una de las muestras a los 14 días y 28 días, se evidencian en las Figuras 7C y 7D. La resistencia máxima de tracción de la muestra AAMH3 tiende a ser constante en el tiempo así como con el cambio de espesor.

En conclusión para la muestra AAMH3, a partir del día 7 de curado el aumento en el espesor de la matriz circundante no es significativo para la resistencia a la tracción máxima, ya que tiende a ser constante. Evidenciándose que no existe dependencia entre el espesor de la matriz circundante y la resistencia a la tracción o adherencia.

Se observa que cuando la relación sílice:alúmina aumenta en proporción en los AAMH la resistencia a la tracción máxima de las muestras también aumenta. El aumento de esta proporción también incide en el espesor en la matriz circundante, particularmente porque

tras los 7 días de curado la resistencia a tracción máxima de la muestra de relación sílice:alúmina 5,06 no cambia en función del espesor de matriz circundante. Por lo tanto, la variable de mayor importancia en el análisis de datos es la relación sílice:alúmina, ya que todas las muestras aumentan en la resistencia a la tracción máxima cuando esta relación aumenta.

Ejemplo 8. Ensayos de compresión

En la Figura 8 se analizaron las resistencias a compresión de las muestras AAMH y del CP-control a los 2, 7, 14 y 28 días, presentándose los siguientes resultados. A los 2 días la muestra que presenta una mayor resistencia a la compresión es AAMH3 con 22 MPa, mientras que las muestras de CP-control y AAHM2 presentan un comportamiento mecánico similar con una resistencia a la compresión de 16 MPa y 18 MPa, respectivamente. Por otro lado, la muestra AAHM1 presenta la resistencia más baja a los 2 días. A los 7 días la muestra AAMH3 alcanza 30 MPa y continúa siendo la de mayor resistencia mecánica a compresión, a los 14 y 28 días la muestra llega a 34 MPa y se mantiene constante de aquí en adelante. Dado lo anterior, la muestra AAMH3 supera a la muestra control en 8,8 % en su resistencia a compresión a los 28 días de curado.

La muestra AAHM2 en resistencia a compresión presenta un comportamiento similar a la muestra control en todos los periodos de tiempo; a los 7 días alcanzan 24 y 19 MPa, a los 14 días 28 y 26 MPa y al día 28 alcanzan 30 y 31 MPa respectivamente. La muestra control y la muestra AAHM2 tienen velocidades en ganancia de resistencia muy similares. A edades tempranas la velocidad es lenta y posteriormente se acelera. Por el contrario, la muestra AAMH3 es la que más rápidamente logra su máxima resistencia y la muestra AAMH1 es la de menor velocidad en su ganancia de resistencia a compresión.

En conclusión, a medida que aumenta la relación sílice:alúmina en las muestras, la resistencia a la compresión mejora significativamente. En otras palabras, esto significa que a mayor contenido de sílice en el sistema las propiedades mecánicas mejoran.

Ejemplo 9. Ensayo de porosidad mediante petrografía

Se realizó el ensayo de petrografía de acuerdo con la norma ASTM C 856-18a, en donde se realizaron cortes transversales de los cilindros, obteniendo superficies de aproximadamente 14,3 mm². A cada uno de los cortes se les midió la cantidad de vacíos mediante un análisis de imagen, por medio del estereoscopio Nikon SMZ 15000 con fuente de luz NI-150 y el software NIS-Elements con un aumento de 100X. Las imágenes fueron analizadas mediante el software libre ImageJ, donde los poros son marcados de color negro para posteriormente ser cuantificados determinando el área coloreada. Una variación en el área da cuenta de la porosidad del material, permitiendo correlacionarla con los resultados de los ensayos mecánicos (adherencia y compresión).

El análisis de porosidad se realizó a los 2, 7, 14 y 28 días, y se obtuvieron los datos presentados en la Tabla 6 a continuación:

Tabla 6. Resultados de porosidad de las muestras

		AAHM1	AAHM2	AAHM3
2 DÍAS	Promedio de área de poros (mm ²)	1,2	0,7	0,7
	Área total (%)	8,4	5,4	4,7
7 DÍAS	Promedio de área de poros (mm ²)	1,00	0,5	0,3
	Área total (%)	6,8	3,5	2,1
14 DÍAS	Promedio de área de poros (mm ²)	0,7	0,3	0,2
	Área total (%)	4,8	2,2	1,1
28 DÍAS	Promedio de área de poros (mm ²)	0,6	0,2	0,11
	Área total (%)	4,2	1,6	0,8

Con lo anterior se puede concluir que el aumento en la relación sílice:alúmina presente en las muestras, y principalmente en la muestra AAHM3, genera una disminución en la porosidad de las muestras, lo que implica un aumento en la resistencia a la tracción de arrancamiento y resistencia a compresión, lo que coincide con los datos de los ejemplos

previos, demostrando que al presentarse una baja porosidad la muestra presenta mayor resistencia a la compresión y a la tracción, tal y como se evidencia en la Figura 9.

Como lo demuestran los ensayos aquí señalados el aumentar la relación sílice:alúmina o su equivalente silicato de sodio:hidróxido de sodio en la activación alcalina de ceniza volante de carbón, en presencia de un 10 % de hidróxido de calcio y curado a 80 °C, se afecta el comportamiento reológico, las propiedades mecánicas y el refinamiento de poros de los AAMH base ceniza volante.

En contraste el CP-control inicia con una tasa baja en ganancia de resistencia mecánica y una alta porosidad hasta los primeros 7 días. Además, la velocidad de reacción del CP-control a los 7 días es de 8,6 % lo que no genera un aumento significativo en la resistencia a la tracción. A partir de los 7 días las muestras de micro-concreto base PC aumentan en su resistencia mecánica y disminuyen sus vacíos en la matriz de micro-concreto.

Por el contrario, la muestra AAMH3 tiene la mayor tasa de ganancia de resistencia mecánica y refinamiento de poros a todas las edades de curado, además, de todas las muestras, es la que presenta el mejor comportamiento mecánico, lo que se da gracias a la mayor presencia de sílice, en los geles cementantes y una mayor formación de los mismos, dando como resultado una matriz cementante menos porosa y más resistente.

Los resultados obtenidos a lo largo del presente desarrollo indican que el aumento de la relación sílice:alúmina de los AAMH base ceniza volante tiene una incidencia directa sobre el mejoramiento de las propiedades mecánicas y el refinamiento de poros, lo que lleva a concluir que si la matriz de concreto es suficientemente densa y poco porosa (es decir, a una mayor relación sílice:alúmina), la adherencia mejora independientemente del espesor de la matriz circundante.

Teniendo en cuenta lo anterior y el modelo del cálculo de la adherencia dado por la teoría del cono de tracción propuesta por Tepfers, el cual está en función del espesor de la matriz circundante (Cy) y el área de la barra (φ), se propone una modificación teórica al modelo, que incluya un factor R en función de la matriz circundante (Cy') y de la relación

sílice:alúmina (S/A) o silicato de sodio:hidróxido de sodio (S'/HS). A continuación, se presenta el planteamiento teórico de la modificación propuesta:

$$\sigma t_{max} = \frac{\tau \cdot \tan \alpha \cdot \left(\left(Cy + \frac{\varphi}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varphi}{2} \right)^2 \right)}{\left(Cy + \frac{\varphi}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varphi}{2} \right)^2} \quad \left. \vphantom{\frac{\tau \cdot \tan \alpha \cdot \left(\left(Cy + \frac{\varphi}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varphi}{2} \right)^2 \right)}{\left(Cy + \frac{\varphi}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varphi}{2} \right)^2}} \right\} \text{Modelo de Tepfers}$$

5

$$\left. \vphantom{\frac{\tau \cdot \tan \alpha \cdot \left(\left(Cy + \frac{\varphi}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varphi}{2} \right)^2 \right)}{\left(Cy + \frac{\varphi}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varphi}{2} \right)^2}} \right\} \text{Modificación teórica propuesta al modelo de Tepfers}$$

$$R \rightarrow f \left(Cy', \frac{S}{A} \left(\frac{S'}{HS} \right) \right) = \begin{cases} Cy', & Cy' \geq 0 \\ \frac{S}{A} \left(\frac{S'}{HS} \right), & 3 \leq \frac{S}{A} \leq 6 \end{cases}$$

5 Considerando que para el caso de los AAMH base ceniza volante la relación sílice:alúmina tiene una incidencia directa sobre el mejoramiento de la adherencia, el modelo propuesto incluye el factor R que tendrá valores de acuerdo con los resultados presentados en este documento y resumidos en la ecuación anterior. Dicho factor está en

10 función del espesor de la matriz circundante (Cy'), para concretos donde dicho espesor tenga incidencia sobre la adherencia, y la relación sílice:alúmina (S/A) o silicato de sodio:hidróxido de sodio (S'/HS).

