



Efecto de la ceniza volante en las propiedades mecánicas de concretos hechos con agregado calizo triturado de alta absorción

J. A. Canul¹, E. I. Moreno², J. M. Mendoza-Rangel¹.

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), Facultad de Ingeniería Civil, México, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66450, +52 (81) 83 29 40 00 ext. 7239, <http://fic.uanl.mx>.

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), México, Av. Industrias no Contaminantes por Periférico Norte Apdo. Postal 150 Cordemex, 930-05-50, <http://www.ingenieria.uady.mx>.

Información del artículo

DOI:

http://dx.doi.org/10.21041/ra_v6i3.150

Artículo recibido el 30 de abril de 2016, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 23 de agosto de 2016. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2017.

RESUMEN

El concreto elaborado con agregado calizo triturado de alta absorción de Yucatán, México, es considerado de baja calidad. El objetivo de la investigación es mejorar las propiedades mecánicas del concreto elaborado con este tipo de agregado incorporando ceniza volante (CV). Las propiedades medidas fueron: Resistencia a la compresión (RC) y módulo de elasticidad. Se utilizaron relaciones agua/cemento de 0.5 y 0.7, la CV se incorporó como sustitución parcial del cemento en un 20% y 40%, y como aditivo mineral en un 10% y 20%. Los resultados indican que la CV puede ser utilizada en concretos con ACTAA como agregado inerte fino ya que logra mantener una RC similar a la referencia. Se presentan ecuaciones para la predicción de propiedades mecánicas.

Palabras clave: ceniza volante; agregado calizo; absorción; resistencia a la compresión; módulo de elasticidad.

ABSTRACT

Concrete made with high-absorbent crushed limestone aggregates from Yucatán, México are well known as a low quality concrete. The aim of this investigation is to enhance the mechanical properties of concrete with high absorbent crushed limestone aggregates and fly ash. The measured properties were: compressive strength and elastic modulus. The water/cement ratios were 0.5 and 0.7, fly ash was incorporated as partial substitution of cement with 20% and 40% and as a mineral additive in 10% and 20%. Results show that fly ash can be used in this kind of concretes as mineral additive due to compressive strength was similar to those reference samples. Finally, an equation for predicting mechanical properties is reported.

Keywords: fly ash; limestone aggregates; absorption; compressive strength; elastic modulus.

RESUMO

O concreto produzido com agregado calcário de alta absorção de Yucatan, no México, é considerado de baixa qualidade. O objetivo deste estudo é o de melhorar as propriedades mecânicas do concreto fabricado com este tipo de agregado incorporando cinza volante (CV). As propriedades medidas foram: resistência à compressão (RC) e módulo de elasticidade. Foram utilizadas relações água/cimento de 0,5 e 0,7, a CV foi incorporada como substituição parcial de cimento em 20% e 40%, e como um aditivo mineral a 10% e 20%. Os resultados indicam que a CV pode ser usada nesses concretos como um agregado miúdo inerte, pois apresenta uma resistência à compressão similar a amostra de referência. São apresentadas equações para a previsão das propriedades mecânicas.

Palavras chave: cinzas volantes; agregados de calcário; absorção; resistência à compressão; módulo de elasticidade.

Autor de contacto: J. M. Mendoza-Rangel (jose.mendozarn@uanl.edu.mx)

1. INTRODUCCIÓN

Los agregados que se utilizan en el concreto pueden ocupar hasta $\frac{3}{4}$ partes del volumen total del concreto y pueden influir en mayor o menor grado en la trabajabilidad, propiedades mecánicas, la durabilidad y porosidad del mismo. También disminuyen los costos y proporcionan estabilidad. Por lo que la caracterización de los agregados es indispensable para diseñar y predecir el comportamiento del concreto.

Los concretos elaborados en la Península de Yucatán utilizan agregado de roca caliza triturada cuyas principales características son alta porosidad, alta absorción, densidades bajas, alta fragilidad y alta densidad de finos, que, en comparación con agregados de poca absorción, estas características son propias de un agregado deficiente (Moreno y Arjona, 2011). Por lo que, en este tipo de concretos, la fase agregado afecta las propiedades mecánicas del concreto tales como la Resistencia a la Compresión (RC) y el Módulo de Elasticidad (ME), generando la necesidad de utilizar mayores cantidades de cemento para alcanzar los requerimientos mecánicos objetivos.

Por su parte, Solís y Moreno (2012) investigaron la RC máxima para el diseño de concreto con Agregado Calizo Triturado de Alta Absorción (ACTAA) con relaciones a/c entre 0.20 y 0.45 con cantidades de cemento desde 460 a 1300 kg/m³, sin considerar adiciones puzolánicas. La RC máxima fue aproximadamente de 500 kg/cm² a 28 días, y una RC promedio de aproximadamente 600 kg/cm² a edades posteriores. No se observó que la RC del concreto aumentara significativamente debido a un incremento mayor a 850 kg/m³ de cemento, debido a que los agregados ya habían llegado a su máxima capacidad.

Siendo el cemento el material del concreto más costoso tanto económicamente como ambientalmente, utilizar materiales cementicios suplementarios podría ser considerado una necesidad. Las puzolanas son materiales silíceos o sílico-aluminosos que por sí mismos poseen un poco o ningún valor cementicio pero que lo tendrán divididos finamente o en presencia de humedad, reaccionando químicamente con el hidróxido de calcio (CH) a temperaturas normales para formar compuestos que poseen propiedades cementantes (ASTM C-125). Por lo que las puzolanas pueden ser utilizadas para sustituir parcialmente el cemento portland o como adiciones minerales al concreto, obteniendo propiedades mecánicas similares o mayores que en concretos base cemento portland.

En Yucatán, la aplicación de puzolanas no es común debido a que en su relieve no se encuentran regiones volcánicas y la industria no genera residuos con características puzolánicas. Sin embargo, Aportela y Pardo L. (2002) estudiaron la factibilidad técnica de utilizar ceniza del volcán Popocatépetl como material cementante en el concreto con ACTAA, los autores observaron que la RC disminuyó conforme se le incorporaba ceniza de volcán por sustitución de cemento portland y agregado fino.

En la región de Nava, México, existe una carboeléctrica que produce grandes cantidades de ceniza volante (CV) debido a la quema del carbón pulverizado. Por su origen, esta CV es clasificada como artificial, y por su composición química de óxidos se considera de Clase F, según la ASTM C 618. Se han reportado concretos de alta resistencia mecánica a la compresión con altos contenidos de CV de la región de Nava y con contenidos bajos de cemento Pórtland (100 – 150 kg/m³), siendo imprescindible el uso de aditivo superfluidificante para ambas dosificaciones para alcanzar la trabajabilidad esperada (Valdez P. et al 2007). En el trabajo de Valdez P. et al. no se investigó acerca de la actividad puzolánica de la C.V; sin embargo, al verse incrementada la RC de un concreto, comúnmente el ME tiende a incrementar también y la C.V. de Nava se posicionó para ser un material potencialmente útil en la industria del concreto.

Siddique R. (2003) investigó las propiedades mecánicas del concreto (RC y ME) con adiciones minerales de CV en un 10%, 20%, 30%, 40% y 50%; en los resultados se obtienen valores mayores a la referencia en todas las adiciones, además el autor concluye que la CV clase F puede ser utilizada para uso estructural.

Las porosidades registradas en el concreto con ACTAA en Yucatán oscilan entre el 18% y 25% para diferentes relaciones a/c, siendo éste un valor muy elevado a comparación de concretos elaborados con otro tipo de agregados. La disminución de la porosidad en la pasta cementante con el uso de CV de la región de Nava se propone como una solución para que el concreto con ACTAA incremente sus propiedades mecánicas.

El objetivo de estudio fue determinar la factibilidad del uso de la CV para disminuir la porosidad e incrementar la RC y ME del concreto con ACTAA. Estudiando también, la posibilidad de un ahorro en la cantidad de cementante con las mezclas de sustitución parcial de cemento por CV. Sin embargo, viéndolo desde el punto social, darle un uso y espacio a un desecho industrial como la CV también tiene un impacto importante para la región aledaña donde se produce.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales utilizados para la fabricación de los especímenes de las mezclas de concreto fueron caracterizados con base en la normativa de la Sociedad Americana para ensayos y materiales (ASTM). Se utilizó cemento portland compuesto CPC 30R en la fabricación de los especímenes debido a que es uno de los cementos más utilizados en la península de Yucatán y en este proyecto se trata de ver la aplicabilidad de la CV en condiciones normales de trabajo en obra. Este cemento cumple con los requerimientos de la norma NMX C-414 ONNCCE.

Se obtuvo la morfología de la CV mediante un análisis de imagen con un microscopio electrónico de barrido (SEM), la composición química de óxidos por medio de fluorescencia de rayos x (FRX), la distribución de tamaño de partícula (DTP) por medio de difracción laser. Adicionalmente se obtuvieron el índice de actividad resistente (IAR) y la densidad.

El método de proporcionamiento del concreto para el diseño de mezclas usado fue el del Instituto Americano del Concreto (ACI 211.1), con dos modificaciones:

1. La absorción del agregado grueso y fino se tomó como el 70% de la absorción calculada de acuerdo a las normas ASTM C127 Y C128 correspondientemente, debido a que las muestras de agregados no son saturadas durante 24 h sino durante 15 y 60 minutos después de haber sido secada en un horno a 110 °C durante 24 horas (Hernández, 2013).
2. La inclusión de la CV como material cementante (Mezclas SCV-20 y SCV-40, tabla 1) y como aditivo mineral (Mezclas ACV-10 y ACV-20), incluyéndola en el volumen de la mezcla usando su densidad. En el caso de las mezclas adicionadas de CV, se reemplazó porcentaje de agregado fino por CV en el diseño.

Se diseñaron 10 mezclas de concreto, con relación agua/material cementante (a/mc) de 0.5 y de 0.7. En la Tabla 1 se presenta la nomenclatura de cada mezcla de concreto para fines prácticos de lectura. Cada mezcla fue de 55 litros. La cantidad de especímenes de concreto se presenta en la Tabla 2. Los especímenes fueron elaborados conforme a la norma ASTM C 31 y tuvieron un curado sumergido en agua con hidróxido de calcio.

Tabla 1. Nomenclatura de las mezclas de concreto.

Nomenclatura	Número de mezclas	Características
MR	2	Referencia
SCV-20	2	20% de sustitución de cemento por CV
SCV-40	2	40% de sustitución de cemento por CV
ACV-10	2	10% de adición mineral de CV
ACV-20	2	20% de adición mineral de CV

Tabla 2. Especímenes de las mezclas de concreto.

Resistencia a la compresión a los 28 días	Resistencia a la compresión a los 91 días.	Módulo de elasticidad	Porosidad, densidad y absorción
4 especímenes de 10 cm x 20 cm	4 especímenes de 10 cm x 20 cm	4 especímenes de 15 cm x 30 cm	4 especímenes de 7.5 cm x 10 cm

Se determinó la RC, ME y porosidad de acuerdo a las normas ASTM correspondientes.

3. RESULTADOS

En la Tabla 3 se presenta la caracterización física de los agregados grueso y fino: Peso volumétrico, densidad, absorción, resistencia a la abrasión y módulo de finura. Los valores presentados son el promedio de 3 muestras. En las figuras 1 y 2 se presentan las granulometrías del agregado grueso y el agregado fino. Se puede observar que solo el agregado fino llega a los estándares especificados por las normas ASTM C33.

Tabla 3. Caracterización de los agregados

Tipo de agregado	Gravedad específica (SSS)	Peso volumétrico suelto seco (kg/m ³)	Peso volumétrico varillado seco (kg/m ³)	Absorción (%)	Resistencia a la abrasión (%)	Módulo de finura
Grueso	2.32	1113.41	1234.40	8.1	32	-----
Fino	2.42	1280.36	-----	6.8	-----	2.72

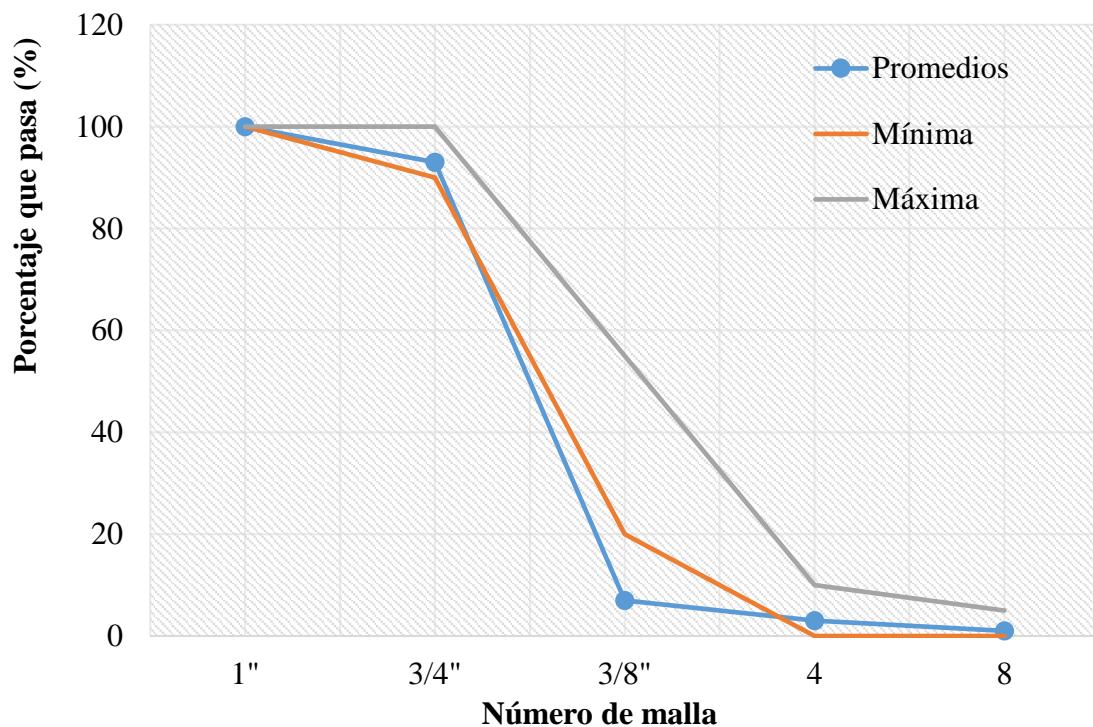


Figura 1. Granulometría agregado grueso.

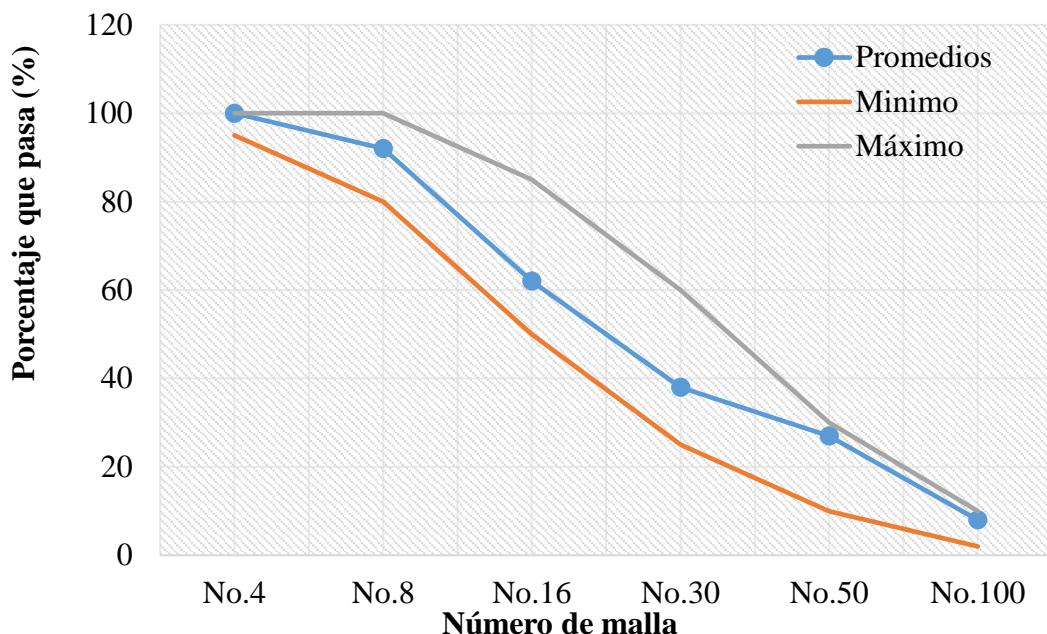


Figura 2. Granulometría agregado fino.

Para que la CV propuesta pudiera ser utilizada de acuerdo a la norma ASTM C 618, debería cumplir con una cantidad de óxidos, una fineza y un IAR. La sumatoria de la cantidad de óxidos de aluminio, silicio y hierro deberá tener como mínimo un 70%. La densidad de la CV obtenida de acuerdo a las especificaciones de la ASTM C 311 y ASTM C 188 fue de 2.0 g/cm³. En la tabla 4 se puede observar la caracterización de la CV utilizada.

Tabla 4. Contenido de óxidos de la CV

Compuesto	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
Cantidad (%)	3.315	1.667	33.105	56.511	0.344	0.518	0.698	0.357	1.486

Se determinó la distribución granulométrica de la ceniza volante por medio de la técnica de DTP por medio de láser con el equipo MICROTAC (Figura 3). La norma ASTM C 618 nos dice que la muestra de CV no deberá retener más del 35% por la malla no. 325, la cual tiene un tamaño de 45 micrómetros.

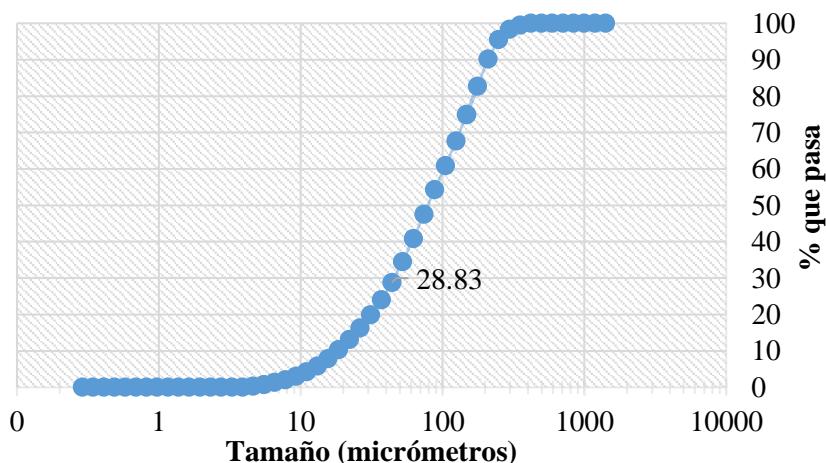


Figura 3. Distribución granulométrica.

Por último, la norma ASTM C 618 nos indica que la CV clase F deberá tener un IAR mínimo a los 7 o 28 días de 75% para que pueda ser considerado su uso en el concreto. En la Tabla 5 se presentan los resultados.

Tabla 5. Resultados IAR.

Nomenclatura	Edad	RC promedio (Kg/cm ²)	IAR (%)
MR-7	7 días	327.3	75%
MCV-7	7 días	244.6	
MR-28	28 días	401.5	82%
MCV-28	28 días	328.9	

Las imágenes de SEM fueron tomadas a 1000 y 10000 aumentos (Figura 4).

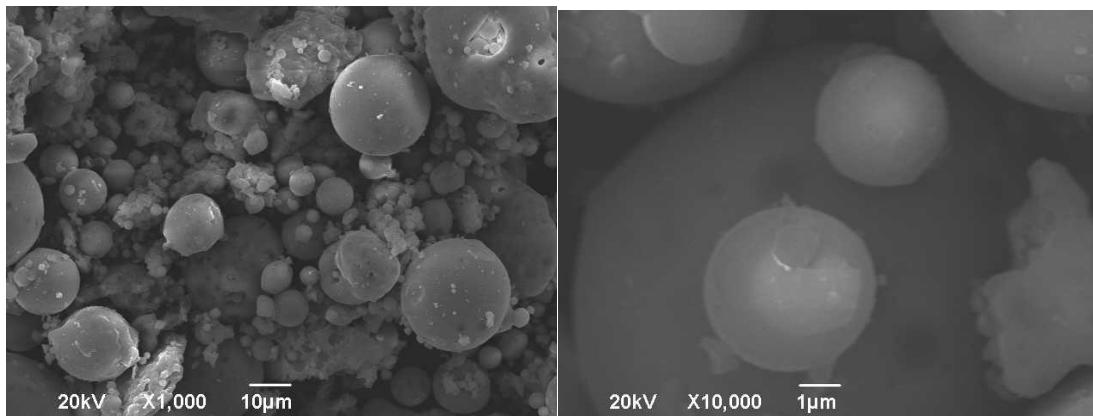


Figura 4. Imágenes de la ceniza volante tomadas con el microscopio electrónico de barrido.

En cuanto a las mezclas de concreto diseñadas se utilizaron las siguientes proporciones sin el ajuste de humedad de los agregados (Tabla 6). Los resultados de las pruebas de RC a los 28 y 91 días, ME a 28 días y la porosidad a 91 días se pueden ver en las tablas 7, 8 y 9 consecutivamente.

Tabla 6. Proporciones de las mezclas de concreto

	SCV-40	SCV-20	MR	ACV-10	ACV-20	SCV-40	SCV-20	MR	ACV-10	ACV-20
Relación (a/mc)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Agua (Kg/m ³)	200.9	202.9	205	204	202.9	202.1	203.5	205	204.3	203.5
Cemento (kg/m ³)	241.1	324.7	410	407.9	405.9	173.2	232.6	292.9	291.8	290.8
CV (kg/m ³)	160.7	81.2	0	40.8	81.2	115.5	58.2	0	29.2	58.2
Agregado grueso (kg/m ³)	823.7	832	840.4	836.1	832	828.4	834.3	840.4	837.4	834.3
Agregado fino (kg/m ³)	646.4	665	683.9	643.1	602.6	745.7	759.7	773.9	744.4	715
Revenimiento (mm)	30	50	30	50	40	60	100	30	160	140
Aire (%)	4.2	3.8	3.9	4	3.9	4.3	4.1	4.2	4	4.1
Peso volumétrico (kg/m ³)	2086	2124	2180	2145	2125	2071	2100	2143	2120	2114

Tabla 7. Resultados de prueba de RC.

Mezcla	a/mc	Esfuerzo promedio (kg/cm ²)	Desviación estándar (kg/cm ²)	Coeficiente de variación (%)	Esfuerzo promedio (kg/cm ²)	Desviación estándar (kg/cm ²)	Coeficiente de variación (%)
28 días		91 días					
SCV-40	0.5	232.9	8.1	3	272.9	17.1	6
SCV-20	0.5	300.0	17.0	6	328.4	31.3	10
MR	0.5	329.5	12.7	4	360.6	17.1	5
ACV-10	0.5	335.3	9.9	3	358.9	17.0	5
ACV-20	0.5	328.2	5.4	2	356.7	13.9	4
SCV-40	0.7	145.9	7	5	182.6	15.1	8
SCV-20	0.7	206.3	12.8	6	241.5	15.2	6
MR	0.7	275.1	7.2	3	295.6	10.6	4
ACV-10	0.7	241.1	5.5	2	285.0	7.0	2
ACV-20	0.7	228.2	3.0	1	283.1	2.3	1

Tabla 8. ME promedio.

Mezcla	a/mc	f'c (kg/cm ²)	ME promedio (kg/cm ²)	Desviación estándar (kg/cm ²)	Coeficiente de variación (%)
SCV-40	0.5	232,9	200544,4	11136.7	6
SCV-20	0.5	300,0	218886,6	11208.6	5
MR	0.5	329,5	234237,5	32788.9	14
ACV-10	0.5	335,3	241605,9	12205.2	5
ACV-20	0.5	328,2	235716,8	3842.9	2
SCV-40	0.7	145,9	157068,7	3886.7	2
SCV-20	0.7	206,3	189455,2	4494.7	2
MR	0.7	275,1	215601,9	11315.6	5
ACV-10	0.7	241,1	210051,6	7107.6	3
ACV-20	0.7	228,2	201662,4	8718.5	4

Tabla 9. Porosidad en el concreto endurecido a los 91 días.

Mezcla	Relación (a/mc)	Edad (días)	Porosidad promedio (%)	Desviación estándar (%)	Coeficiente de variación (%)
SCV-40	0.5	91	24.3	0.56	2
SCV-20	0.5	91	22.0	0.13	1
MR	0.5	91	21.5	0.46	2
ACV-10	0.5	91	22.9	0.55	2
ACV-20	0.5	91	23.1	0.59	3
SCV-40	0.7	91	25.3	0.2	1
SCV-20	0.7	91	23.5	0.22	1
MR	0.7	91	21.8	0.68	3
ACV-10	0.7	91	23.9	0.30	1
ACV-20	0.7	91	23.1	0.49	2

4. DISCUSIÓN

El agregado grueso no cumplió con la granulometría que estipula la norma ASTM C 33, tiene una insuficiente cantidad de agregado de tamaño 3/8"; esto puede deberse a una mala trituración. La absorción del agregado grueso es alta debido a su alta porosidad y la densidad es baja. En cuanto al agregado fino, su granulometría cumplió con los requerimientos de la norma ASTM C 33. De acuerdo a su módulo de finura se considera como una arena mediana. Sin embargo, la densidad y la absorción son similares al agregado grueso. La CV cumplió con los requerimientos de contenido de óxidos

mínimo, se sumaron un 91.1%, lo cual la clasifica como una CV Clase F; así como también obtuvo un índice de actividad resistente de 75% a 7 días y de 82% a 28 días cumpliendo con los requerimientos de la norma. La densidad de la CV es menor que la del cemento y los agregados, sin embargo, esta entre los valores que menciona Neville, 1998. La CV no cumplió con los requerimientos de fineza para su uso como puzolana; si observamos el punto marcado en la Figura 3, solo el 28.83% tiene el tamaño de partícula de 44 micrómetros; sin embargo, no se llevó a la molienda porque el objetivo era observar el fenómeno de la CV en las propiedades mecánicas en su forma original, sin ningún tipo de modificación a como fue obtenida. Al usarse la CV como adición mineral, un porcentaje de volumen del agregado fino es sustituido. De acuerdo a la norma ASTM C 33, la CV tendría muchos finos para utilizarse como “agregado”; sin embargo, la fineza de origen de la C.V. le daría un mejor empaquetamiento a la mezcla de concreto. En las imágenes de SEM tomadas (Figura 4), se observa que la CV está conformada por partículas esféricas.

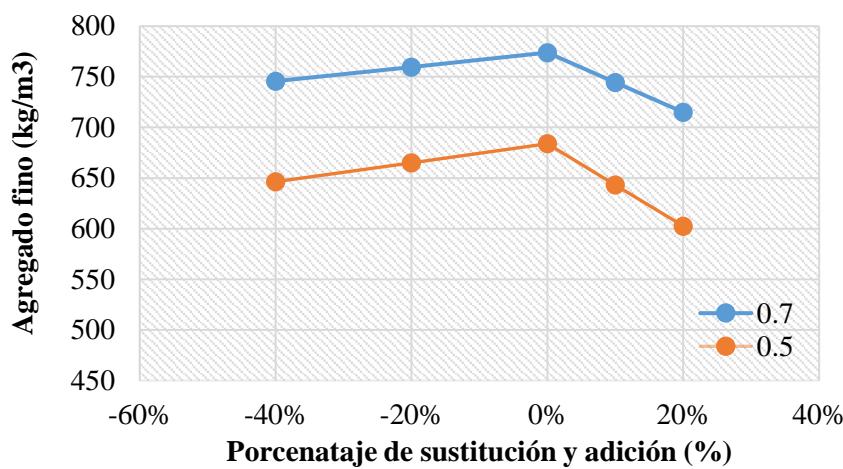


Figura 5. Variación del agregado fino.

En el diseño de mezclas se observó una disminución en la cantidad del agregado fino conforme se agregaba CV sin importar si fue por sustitución de cemento o como adición mineral (Figura 5). Esto se debe a que la CV ocupa más volumen que el cemento portland para poder alcanzar el peso de sustitución requerido en el diseño de mezclas por la diferencia de densidades, entonces, al tener mayor volumen de pasta cementante, se refleja una reducción del volumen del agregado fino y, por lo tanto, en su peso. Por lo que la incorporación de la CV provee un ahorro de materia prima.

La RC en los especímenes de relación a/mc de 0.5, la mezcla ACV-10 alcanzó una mayor RC que la que propone el ACI 211 que es de 334.4 kg/cm² a los 28 días, los otros especímenes no alcanzaron el estándar. En los especímenes de 91 días de edad, las mezclas MR, ACV-10 y ACV-20 obtuvieron mayor RC que la RC objetivo del ACI, sin embargo, comparada con la MR de 91 días, ninguna mezcla con CV obtuvo una mayor RC.

En los especímenes de relación a/mc de 0.7 todas las mezclas alcanzaron la RC que propone el ACI 211 de 200 kg/cm², excepto por la SCV-40, a los 28 días y 91 días de edad. La CV no mejoró la RC en ninguna sustitución y/o adición mineral comparada con las mezclas de referencia, por lo que se puede decir que los aumentos de RC de 28 a 91 días son debido al cemento. Mediante un análisis de varianza (ANOVA), se buscó una relación entre la relación a/mc, el porcentaje de sustitución o adición de CV y la edad del concreto para predecir la RC del concreto (Tabla 10). Se tomó como variables independientes la edad del concreto, la relación a/c real, la relación de volumen de CV/volumen total de la mezcla y la variable dependiente fue la RC como se muestra en la Tabla 10. Mediante una regresión múltiple en el programa se obtuvo la ecuación 1.

$$f'c = (0.54) * (edad) - 291.21 * (a/c) + 312.12 * \left(\frac{Vol\ C.V.}{m^3} \right) + 447.5 \quad (1)$$

Donde: $f'c$ = RC en kg/cm^2 , Edad = Edad del concreto en días, a/c = Relación a/c real, $\text{Vol. C.V.}/m^3$ = Relación de volumen de CV por m^3 .

Tabla 10. Relación entre la edad del concreto, la relación a/mc , la relación a/c real, la relación del volumen de CV/volumen total de la mezcla y la RC.

Mezcla	a/mc	Edad (días)	a/c real	Vol C.V/vol total	RC (kg/cm^2)	RCcalculada (kg/cm^2)	Porcentaje de error (%)
SCV-40	0.5	28	0.8	0.05	232.9	236.3	-1%
SCV-20	0.5	28	0.6	0.03	300.0	288.9	4%
MR	0.5	28	0.5	0	329.5	317.1	4%
ACV-10	0.5	28	0.5	0.01	335.3	321.2	4%
ACV-20	0.5	28	0.5	0.03	328.2	325.3	1%
SCV-40	0.5	91	0.8	0.05	272.9	270.6	1%
SCV-20	0.5	91	0.6	0.03	328.4	323.1	2%
MR	0.5	91	0.5	0	360.6	351.4	3%
ACV-10	0.5	91	0.5	0.01	358.9	355.5	1%
ACV-20	0.5	91	0.5	0.03	356.7	359.5	-1%
SCV-40	0.7	28	1.2	0.04	145.9	134.6	8%
SCV-20	0.7	28	0.9	0.02	206.3	213.7	-4%
MR	0.7	28	0.7	0	275.1	258.9	6%
ACV-10	0.7	28	0.7	0.01	241.1	261.8	-9%
ACV-20	0.7	28	0.7	0.02	228.2	264.7	-16%
SCV-40	0.7	91	1.2	0.04	182.6	168.9	8%
SCV-20	0.7	91	0.9	0.02	241.5	248.0	-3%
MR	0.7	91	0.7	0	295.6	293.2	1%
ACV-10	0.7	91	0.7	0.01	285.0	296.1	-4%
ACV-20	0.7	91	0.7	0.02	283.1	299.0	-5%

Para el uso de la ecuación 1, se deben tomar las siguientes consideraciones:

- Los especímenes deberán ser fabricados con Cemento Portland Compuesto 30R y CV Clase F.
- Los especímenes deberán someterse a un curado sumergido en agua por un mínimo de 28 días.
- El concreto deberá utilizar ACTAA con un diámetro nominal de $3/4"$.
- El concreto deberá diseñarse de acuerdo a la recomendación del ACI 211, tomando en cuenta los cambios explicados en la metodología y diseñado para un revenimiento de 7.5cm -10cm.

Con el fin de tener un punto de comparación, se determinó el ME de cada mezcla con las formulas propuestas por las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción del Distrito Federal (NTC RDF) para concreto clase 2 y peso volumétrico menor a 2200 kg/m^3 (ecuación 2), las normas de diseño del ACI 318 para concretos con peso volumétrico entre 1440 kg/m^3 y 2480 kg/m^3 (ecuación 3) y una investigación realizada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY) por Hernández en el 2013 donde establece una relación entre las densidades de los agregados y la raíz cuadrada de la RC para predecir el ME en concretos con ACTAA, (ecuación 4). La comparación de los resultados se encuentra en la Tabla 11.

$$E = 8000 * \sqrt{f'c} \quad (2)$$

$$E = W_c^{1.5} x 0.14 \sqrt{f'c} \quad (3)$$

$$E = 2273.69 \times GEAF \times GEAG \times \sqrt{f'c} \quad (4)$$

Donde: E= ME en kg/cm², Wc= Peso volumétrico del concreto en estado fresco en kg/m³, f'c= RC en kg/cm², GEAG (adimensional)= Gravedad específica del agregado grueso (densidad SSS), GEAF (adimensional)= Gravedad específica del agregado fino (densidad SSS), f'c (kg/cm²)= RC del concreto.

Tabla 11. Comparación de los datos obtenidos y otros modelos para determinar el ME.

Mezcla	a/mc	f'c ^{1/2}	ME obtenido (kg/cm ²)	ME (NTC RCDF)	ME (Hernández 2013)	ME (ACI 318)
SCV-40	0.5	15,26	200544,4	122085,9	194809,4	201300,4
SCV-20	0.5	17,32	218886,6	138561,8	221099,6	237284,3
MR	0.5	18,15	234237,5	145219,3	231722,9	258740,1
ACV-10	0.5	18,31	241605,9	146485,2	233742,9	254684,9
ACV-20	0.5	18,12	235716,8	144936,9	231272,4	248545,4
SCV-40	0.7	12,08	157068,7	96627,9	154186,9	161137,5
SCV-20	0.7	14,36	189455,2	114902,4	183346,9	193506,7
MR	0.7	16,59	215601,9	132691,5	211732,6	230386,5
ACV-10	0.7	15,53	210051,6	124211,4	198201,2	212120,9
ACV-20	0.7	15,11	201662,4	120860,9	192854,8	205540,9
Diferencia entre el módulo de elasticidad obtenido y los modelos para determinar el módulo de elasticidad.			>39%	>2%	<5%	

Con el objetivo de hacer una similitud con la fórmula de las NTC- RCDF, se determinó la función de K del ME obtenido en la experimentación, con una regresión lineal ajustada en el programa de Microsoft Excel, considerando que para una f'c= 0, se obtendría un ME con valor de 0 (Figura 6). La ecuación obtenida con la regresión lineal fue:

$$E = 13079 \sqrt{f'c} \quad (5)$$

Donde: E= ME en kg/cm², f'c= RC en kg/cm². La ecuación obtenida tiene un valor de K 60% mayor que la que marca la norma NTC RDF, lo cual, lleva a sobredimensionamientos de las estructuras de concreto. Por esto es importante tener una normativa regional de acuerdo al tipo de agregado.

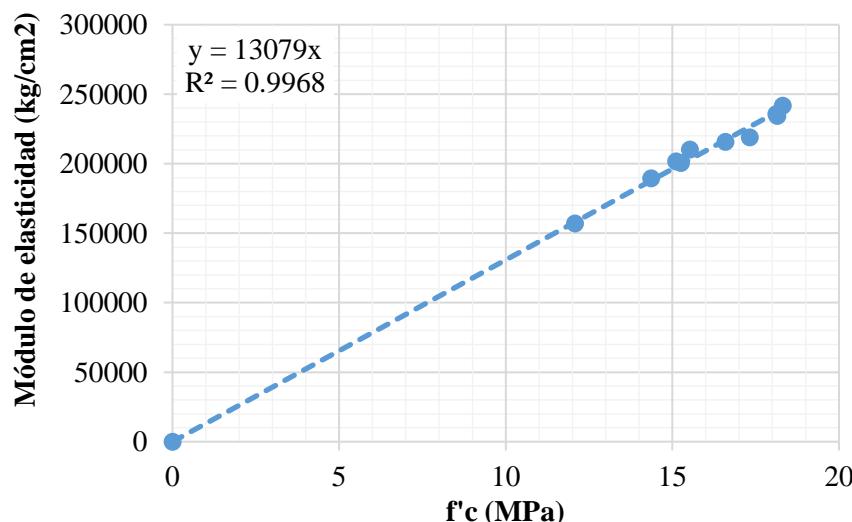


Figura 6. Regresión lineal de los resultados.

Los resultados de la porosidad, densidad y absorción no variaron significativamente con respecto a la incorporación de la CV en el concreto. Sin embargo, se observó un ligero incremento de porosidad en el concreto conforme se incorporaba CV, ver tabla 9.

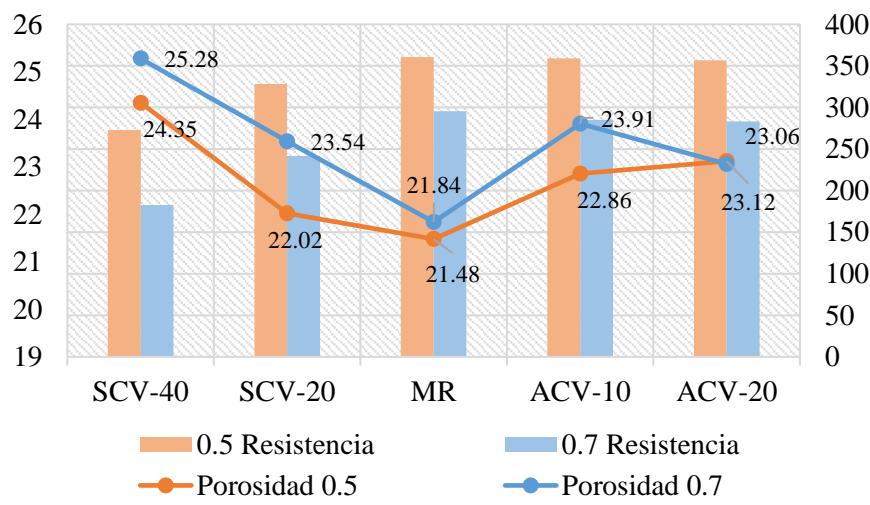


Figura 7. Porosidad y resistencia a la compresión

La porosidad es uno de los factores principales que influyen en la resistencia y durabilidad del concreto, mientras más poroso sea el concreto menor es su resistencia mecánica y mayor es su vulnerabilidad ante la agresividad del medio ambiente (Mehta y Monteiro 1998). En la Figura 7 se pueden observar los resultados de la RC del concreto a los 91 días; los resultados parecen indicar lo siguiente: Se observa la tendencia de disminuir la RC al aumentar la porosidad tomando como punto de referencia la mezcla MR; Sin embargo, los porcentajes de porosidad no varían en más del 4%, y la RC de las mezclas de sustitución si tienen una disminución significativa de la RC comparado con los resultados de las MR. En una investigación de laboratorio de la porosidad del concreto con ACTAA (Solís y Moreno, 2011), concluyeron que el criterio de la porosidad como un indicativo en la calidad del concreto no resultó ser adecuado para ACTAA. Los resultados de esta investigación en cuanto a los porcentajes de porosidad y su relación con la RC parecen ratificar lo mencionado.

5. CONCLUSIONES

La CV clase F de la región de Nava, México se recomienda para utilizarse en concretos con ACTAA en modalidad de agregado inerte fino por las siguientes razones:

- Aunque no se logró incrementar la RC, ésta se mantiene, por lo que la inclusión de la CV podría usarse como un agregado fino inerte.
- Usar la CV como un agregado fino inerte en el concreto podría darle un espacio a este material que actualmente solo se destina a la basura y afecta a la zona aledaña del lugar.

De acuerdo a los resultados en las propiedades mecánicas se concluye que:

- No se presentó actividad puzolánica y, aunque esta ceniza volante hubiera cumplido con ciertos requerimientos para su uso como puzolana, no fue suficiente para mejorar la calidad del concreto con ACTAA. Sin embargo, si se deseara utilizar la CV de Nava sin ningún tipo de molienda o modificación a su origen, podría ajustarse el diseño de mezclas con ayuda de la ecuación 1 y 5 para mantener la RC y ME objetivo.
- El modelo de la ecuación 1 y 2 para determinar la RC y ME para concretos con ACTAA se calculó con el objetivo de evitar el sobredimensionamiento de las estructuras que se construyen en Yucatán y así, optimizar el uso de los materiales de construcción.

Si se quisiera usar la C.V. como una puzolana, se recomienda modificar la fineza de la C.V. para mejorar el empaquetamiento del concreto e incentivar la actividad puzolánica.

6. AGRADECIMIENTOS

Se dedica este artículo en memoria del Dr. Eric Iván Moreno, QEPD, por haber sido un elemento vital en esta investigación y por supuesto, a la Universidad Autónoma de Yucatán en donde se realizó la experimentación. Así como también se agradece al Programa Institucional de Impulso y Orientación a la Investigación (PRIORI-UADY) por el financiamiento de la investigación. También se agradece a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León por proporcionar la ceniza volante y al proyecto Ciencia Básica número 155363 de CONACYT.

7. REFERENCIAS

- ACI 211 (2001), *Proporcionamiento de mezclas de concreto normal, pesado y masivo*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, U.S.A
- Aportela y Pardo L. (2002). “*Determinación de la factibilidad técnica de la utilización de ceniza del Volcán Popocatepetl como material cementante en el concreto*”. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Hernández Carrillo G. (2013) “*Determinación de la influencia de la calidad de los agregados en el concreto*” Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Mehta K., Monteiro P., (1998) “*Concreto: Estructura, propiedades y materiales*” Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.
- Molina Bas O. I., Moragues Terrades A., Gálvez Ruiz J. C. (2008), “*La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigón: Propiedades físicas, difusión del ión cloruro y del dióxido de carbón*”, XXV Reunión del Grupo Español de Fractura, vol.2, 575-580, Madrid, España.
- Neville A. (1999), *Tecnología del Concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. México, D.F.
- ONNCCE (1999), *NMX-C-414-ONNCCE-1999 Industria de la construcción – Cementos hidráulicos – Especificaciones y métodos de prueba*.
- Ramírez de Alba H., Vera Noguez R., Mejía Lopez M., (2012), “*Materiales Cementantes y concretos en las antiguas culturas americanas, segunda parte*”, Construcción y Tecnología en Concreto, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, 22-26, México.
- Órtiz Cahun, C. (2012). “*Módulo de Elasticidad y relación de poisson de concretos con agregados calizos reciclados*”, Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán
- Siddique R. (2003) “*Effect of fine aggregate replacement with class F fly ash on the mechanical properties of concrete*” Cement and Concrete Research, 539–547.
- Siddique e Iqbal (2011), “*Supplementary cementing materials*”, 1a edición, Springer, Alemania, Berlin, Heidelberg
- Solís R., Moreno E. (2005). “*Influencia del curado húmedo en la resistencia a la compresión del concreto en clima cálido húmedo*”. Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, 9 (3), pág. 5-17.
- Solís R., Moreno E. (2006). “*Ánálisis de la porosidad del concreto con agregado calizo*”. Revista de la Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. 21 (3), 57-68.
- Solís R., Moreno E. y Arjona E (2011). “*Resistencia del concreto con agregado de alta absorción y baja relación a/c*”, Revista ALCONPAT. Vol. 2, Número 1, 21-29, México.
- Solís R., Moreno E. (2011) “*Concreto con agregados calizos en clima cálido*”. Editorial Académica Española

- Valdez P., Duran A., Fajardo E., Juárez C. (2008) “*Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Portland y ceniza volante*” Revista FI-UNAM Vol. X. No.1. 2009 39-49
- Valdez P., Duran A., Rivera J., Juárez C. (2007) “*Concretos fluidos con altos volúmenes de ceniza volante*” Revista Ciencia UANL. Universidad Autónoma de Nuevo León. Número 001, 49-57, México.