



Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

## Efeito de cinzas volantes nas propriedades mecânicas de concreto feitos com agregado calcário moído de alta absorção

J. A. Canul<sup>1</sup>, E. I. Moreno<sup>2</sup>, J. M. Mendoza-Rangel<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> 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>.

<sup>2</sup> 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.uday.mx>.

### Información del artículo

DOI:

[http://dx.doi.org/10.21041/ra\\_v6i3.150](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.

© 2016 ALCONPAT Internacional

### Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 3, Septiembre - Diciembre 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893 , [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org).

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de septiembre de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

## RESUMO

O concreto produzido com agregado calcário moído 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 à 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.

## 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.

## 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 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.

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

## 1. INTRODUÇÃO

Os agregados utilizados no concreto podem ocupar até três quartos do volume total de concreto e podem influenciar em maior ou menor grau na trabalhabilidade, propriedades mecânicas, durabilidade e porosidade do mesmo. Também reduzem os custos e proporcionam estabilidade. Assim, a caracterização dos agregados é indispensável para projetar e prever o comportamento do concreto.

Os concretos produzidos na Península de Yucatán utilizam agregado de rocha calcária moída cujas principais características são alta porosidade, alta absorção, baixa densidade, alta fragilidade e elevada densidade de finos, que comparados com os agregados de pouca absorção, estas características são típicas de um agregado deficiente (Moreno e Arjona, 2011). Portanto, neste tipo de concreto, a fase de agregados afeta as propriedades mecânicas do concreto, tais como resistência à compressão (RC) e módulo de elasticidade (ME), gerando a necessidade de utilizar maiores quantidades de cimento para satisfazer os requisitos mecânicos objetivos.

Por sua vez, Solis e Moreno (2012) investigaram a máxima RC para a dosagem de concreto agregado calcário moído de alta absorção (ACTAA) com relações a/c entre 0,20 e 0,45 com consumos de cimento de 460 a 1300 kg/m<sup>3</sup>, sem considerar adições pozolânicas. A RC máxima foi de aproximadamente 500 kg/cm<sup>2</sup> para 28 dias e uma RC média de cerca de 600 kg/cm<sup>2</sup> a idades posteriores. Não se observou que a RC do concreto aumentou significativamente devido a um consumo superior a 850 kg/m<sup>3</sup> de cimento, porque os agregados tinham atingido a sua capacidade máxima.

Sendo o cimento o material do concreto mais caro tanto economicamente como ambientalmente, utilizar materiais cimentícios suplementares poderia ser considerado uma necessidade. As pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que se possuem pouco ou nenhum valor cimentício, mas se são finamente divididos ou na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (CH) a temperaturas normais para formar compostos que possuem propriedades cimentícias (ASTM C-125). Como as pozolanas podem ser usadas para substituir parcialmente o cimento Portland ou como adições minerais ao concreto, podem ser obtidas propriedades mecânicas similares ou superiores que nos concretos base cimento portland.

Em Yucatan, a aplicação de pozolanas não é comum porque em seu relevo não se encontram regiões vulcânicas e a indústria não geram resíduos com características pozolânicas. No entanto, Aportela e Pardo L. (2002) estudaram a viabilidade técnica do uso de cinzas do vulcão Popocatépetl como material cimentício em concreto com ACTAA, os autores observaram que a RC diminuiu conforme se incorporou cinzas do vulcão por substituição de cimento portland e agregado miúdo.

Na região de Nava, México, há uma Central termoelétrica, usina movida a carvão que produz grandes quantidades de cinzas volantes (CV) devido à queima de carvão pulverizado. Por sua origem, esta CV é classificada como artificial, e por sua composição química de óxidos é considerada de Classe F, de acordo com a norma ASTM C 618. Foram relatados concretos com alta resistência mecânica à compressão, com alto teor de CV da região de Nava e com baixo consumo de cimento Portland (100 - 150kg/m<sup>3</sup>), sendo imprescindível a utilização do aditivo superplastificante para ambas as dosagens para alcançar a trabalhabilidade esperada (Valdez P. et al., 2007). No trabalho de Valdez P. et al. (2007) não foi investigada a atividade pozolânica da CV.; no entanto, ao ser aumentada a RC de um determinado concreto, normalmente o ME tende a aumentar também e a CV. de Nava se mostrou um material potencialmente útil na indústria do concreto.

Siddique R. (2003) investigou as propriedades mecânicas do concreto (RC e ME) com adições minerais de CV em 10%, 20%, 30%, 40% e 50%; nos resultados foram obtidos valores maiores do que a referência em todas as adições, ainda o autor conclui que a CV classe F pode ser utilizada para uso estrutural.

As porosidades registradas no concreto com ACTAA em Yucatán variam entre 18% e 25% para diferentes relações a/c, sendo este um valor muito alto em comparação com concretos feitos com outros tipos de agregados. A diminuição da porosidade na pasta cimentícia utilizando CV da região de Nava é proposta como uma solução para que o concreto com ACTAA aumente as suas propriedades mecânicas.

O objetivo do estudo foi determinar a viabilidade do uso da CV para diminuir a porosidade e aumentar a RC e ME do concreto com ACTAA. Também considerando a possibilidade de uma economia na quantidade de cimento com as dosagens de substituição parcial de cimento por CV. No entanto, olhando do ponto social, ao dar um uso e espaço a um resíduo industrial como a CV tem também um impacto importante para a região vizinha onde é produzido.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os materiais utilizados para a fabricação das amostras das dosagens de concreto foram caracterizados com base na Norma da Sociedade Americana para Ensaios e Materiais (ASTM). Foi utilizado cimento portland composto CPC 30R na fabricação dos corpos de prova, porque é um dos mais utilizados na península de Yucatán e este projeto avalia a aplicabilidade da CV em condições normais de obra. Este cimento está em conformidade com os requisitos da norma NMX C-414 ONNCCE.

A morfologia da CV foi obtida por análise de imagem com um microscópio eletrônico de varredura (SEM), a composição química de óxidos por fluorescência de raios-X (FRX), a distribuição de tamanho de partícula (DTP) pela difracção a laser. Além disso, foram obtidos o índice de atividade resistente (IAR) e a densidade.

O método de dosagem utilizado foi o do American Concrete Institute (ACI 211.1), com duas modificações:

1. A absorção de agregados graúdos e miúdos foi considerada como 70% da absorção calculada de acordo com a norma ASTM C127 e C128, correspondentemente, porque as amostras de agregado não são saturadas durante 24h, mas durante 15 a 60 minutos depois de ter sido seca num forno a 110 °C durante 24 horas (Hernandez, 2013).
2. A adição da CV como material cimentício (traços SCV-20 e SCV-40, Tabela 1) e como um aditivo mineral (traços ACV-10 e ACV-20), a inclui no volume da mistura usando a sua densidade. No caso de traços com adição de CV, foi substituída uma porcentagem de agregado miúdo por CV no estudo.

Foram estudados 10 traços de concreto, com relação água/ material cimentício (a/mc) de 0,5 e de 0,7. A Tabela 1 mostra a nomenclatura de cada traço de concreto para fins práticos de leitura. Cada dosagem foi de 55 litros. A quantidade de corpos de prova de concreto está apresentada na Tabela 2. As amostras foram preparadas de acordo com a norma ASTM C 31 e foram curados em imersão em água com hidróxido de cálcio.

Tabela 1. Nomenclatura dos traços de concreto.

Nomenclatura	Número de dosagens	Características
MR	2	Referência
SCV-20	2	20% de substituição de cimento por CV
SCV-40	2	40% de substituição de cimento por CV
ACV-10	2	10% de adição mineral de CV
ACV-20	2	20% de adição mineral de CV

Tabela 2. Corpos de prova das dosagens de concreto.

Resistência a compressão aos 28 dias	Resistência a compressão aos 91 dias.	Módulo de elasticidade	Porosidade, Densidade e Absorção
4 corpos de prova de 10 cm x 20 cm	4 corpos de prova de 10 cm x 20 cm	4 corpos de prova de 15 cm x 30 cm	4 corpos de prova de 7.5 cm x 10 cm

A RC, o ME e a porosidade foram determinadas de acordo com as normas ASTM correspondentes.

### 3. RESULTADOS

Na Tabela 3 se apresenta a caracterização física dos agregados miúdos e graúdos: massa específica aparente, massa específica do grão, absorção de água, resistência à abrasão e módulo de finura. Os valores apresentados são a média de 3 amostras. Nas Figuras 1 e 2 se apresentam a granulometria do agregado graúdo e do agregado miúdo. Pode ser observado que apenas o agregado miúdo atinge os padrões estabelecidos pela norma ASTM C33.

Tabela 3. Caracterização dos agregados

Tipo de Agregado	Massa Específica (SSS)	Massa volumétrica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica compactada seco (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de agua (%)	Resistência à abrasão (%)	Módulo de finura
Graúdo	2.32	1113.41	1234.40	8.1	32	-----
Miúdo	2.42	1280.36	-----	6.8	-----	2.72

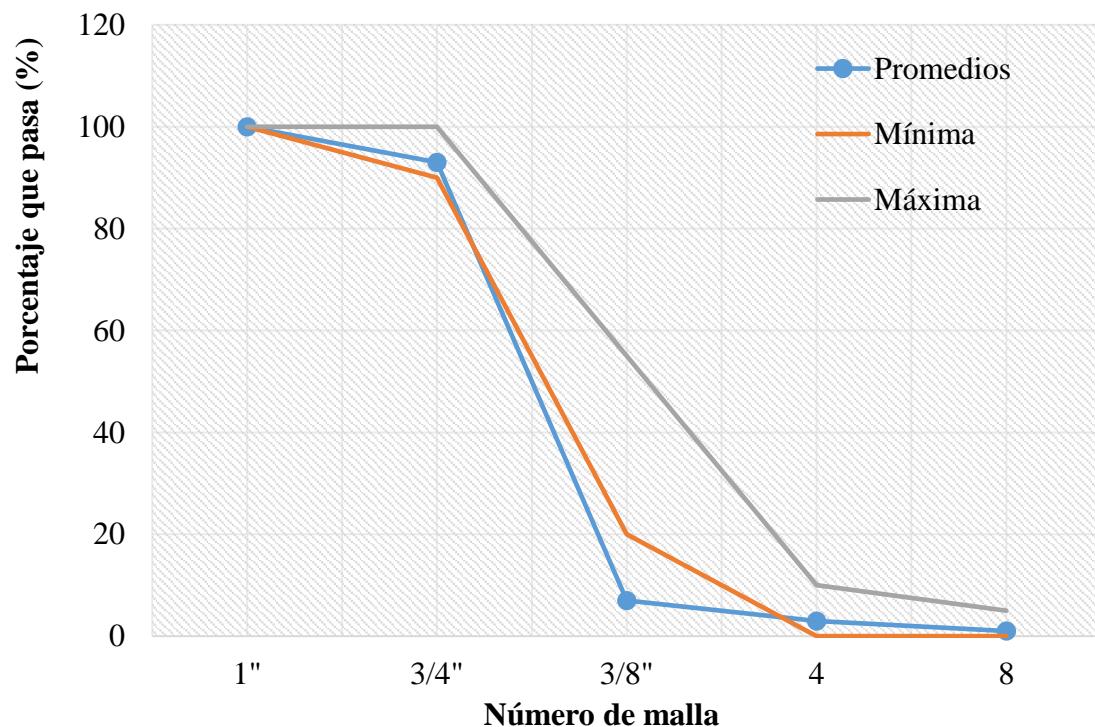


Figura 1. Granulometria do agregado graúdo.

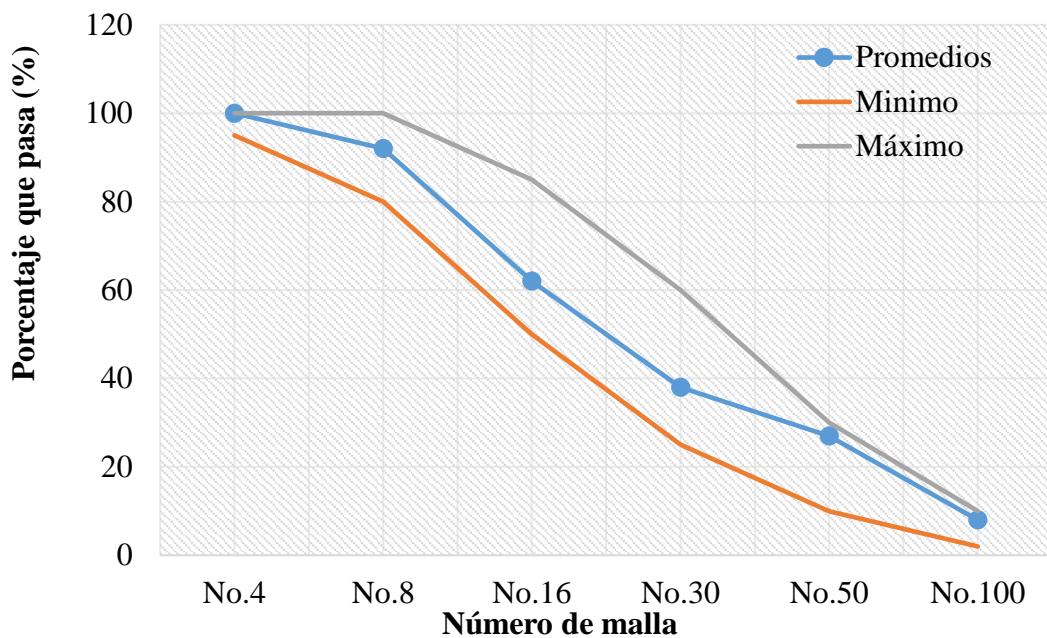


Figura 2. Granulometria do agregado miúdo.

Para que a CV proposta pudesse ser usada de acordo com a norma ASTM C 618, deveria cumprir com uma quantidade de óxidos, uma finura e um IAR. A somatória da quantidade de óxidos de alumínio, de silício e ferro deve ser de pelo menos 70%. A densidade da CV obtida de acordo com as especificações da norma ASTM C 311 e ASTM C 188 foi de 2,0 g/cm<sup>3</sup>. A Tabela 4 mostra a caracterização da CV utilizada.

Tabela 4. Quantidade de óxidos da CV

Composto	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Quantidade (%)	3.315	1.667	33.105	56.511	0.344	0.518	0.698	0.357	1.486

A granulometria das partículas de cinzas volantes foi determinada pela técnica de DTP por meio de laser com o equipamento MICROTRAC (Figura 3). A norma ASTM C 618 diz que a amostra de CV não deve reter mais de 35% na malha n. 325, que tem um tamanho de 45 micra.

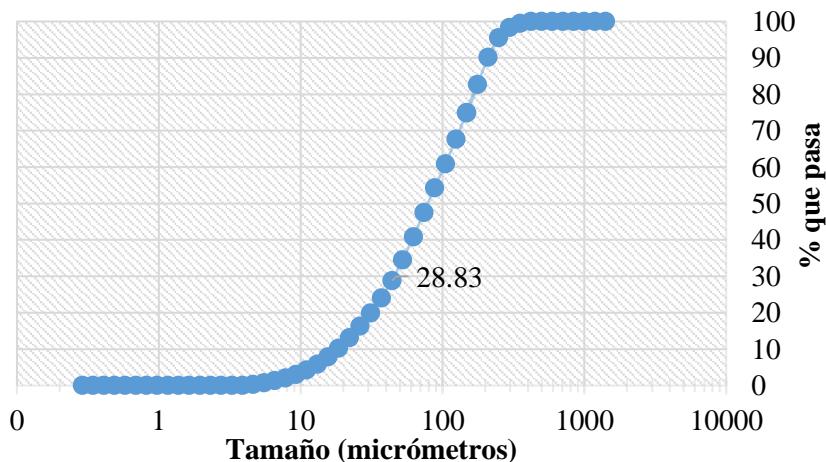


Figura 3. Distribuição granulométrica.

Finalmente, a norma ASTM C 618 indica que a CV classe F deve ter um IAR mínimo aos 7 ou 28 dias de 75%, a fim de serem considerados para utilização em concreto. A Tabela 5 apresenta os resultados.

Tabela 5. Resultados IAR.

Nomenclatura	Idade	RC média (kg/cm <sup>2</sup> )	IAR (%)
MR-7	7 dias	327.3	75%
MCV-7	7 dias	244.6	
MR-28	28 dias	401.5	82%
MCV-28	28 dias	328.9	

As imagens SEM foram tomadas em 1000 e 10.000 ampliações (Figura 4).

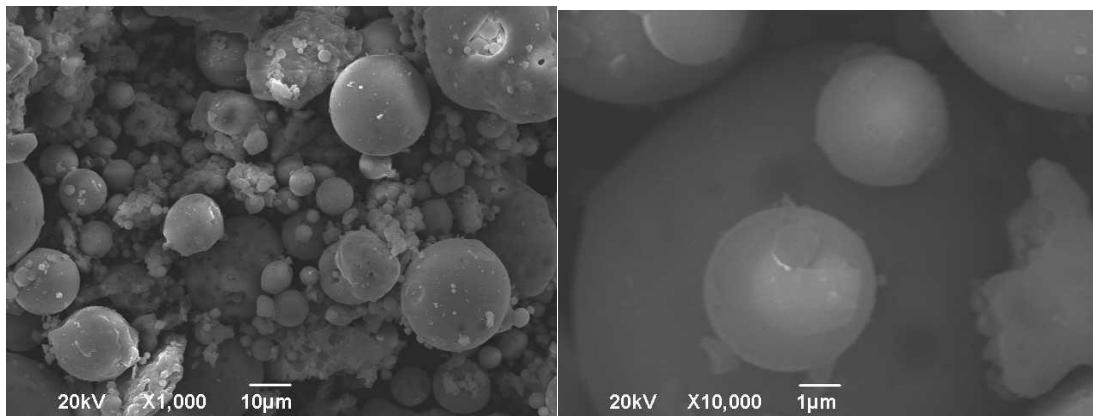


Figura 4. Imagens de cinzas volantes obtidas com microscópio eletrônico de varredura.

Com relação às misturas de concreto estudadas utilizaram as seguintes proporções sem ajuste de umidade dos agregados (Tabela 6). Os resultados dos ensaios de RC aos 28 e 91 dias, ME aos 28 dias e a porosidade aos 91 dias podem ser vistos nas Tabelas 7, 8 e 9, respectivamente.

Tabela 6. Traços de concreto

	SCV-40	SCV-20	MR	ACV-10	ACV-20	SCV-40	SCV-20	MR	ACV-10	ACV-20
<b>Relação (a/mc)</b>	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
<b>Água (kg/m<sup>3</sup>)</b>	200.9	202.9	205	204	202.9	202.1	203.5	205	204.3	203.5
<b>Cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	241.1	324.7	410	407.9	405.9	173.2	232.6	292.9	291.8	290.8
<b>CV (kg/m<sup>3</sup>)</b>	160.7	81.2	0	40.8	81.2	115.5	58.2	0	29.2	58.2
<b>Agregado graúdo (kg/m<sup>3</sup>)</b>		823.7	832	840.4	836.1	832	828.4	834.3	840.4	837.4
<b>Agregado miúdo (kg/m<sup>3</sup>)</b>	646.4	665	683.9	643.1	602.6	745.7	759.7	773.9	744.4	715
<b>Abatimento (mm)</b>	30	50	30	50	40	60	100	30	160	140
<b>Ar (%)</b>	4.2	3.8	3.9	4	3.9	4.3	4.1	4.2	4	4.1
<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2086	2124	2180	2145	2125	2071	2100	2143	2120	2114

Tabela 7. Resultados do ensaio de RC.

Traço	a/mc	Resistência média (kg/cm <sup>2</sup> )	Desvio padrão (kg/cm <sup>2</sup> )	Coeficiente de variação (%)	Resistência média (kg/cm <sup>2</sup> )	Desvio padrão (kg/cm <sup>2</sup> )	Coeficiente de variação (%)
		28 dias			91 dias		
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

Tabela 8. ME médio.

Traço	a/mc	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	ME médio (kg/cm <sup>2</sup> )	Desvio padrão (kg/cm <sup>2</sup> )	Coeficiente de variação (%)
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

Tabela 9. Porosidade no concreto endurecido aos 91 dias.

Traço	Relação (a/mc)	Idade (dias)	Porosidade média (%)	Desvio padrão (%)	Coeficiente de variação (%)
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. DISCUSSÃO

O agregado graúdo não atendeu à granulometria estipulada pela norma ASTM C 33, pois tem uma quantidade insuficiente de partículas com dimensões de 3/8"; isto pode ser devido à uma moagem inadequada. A absorção do agregado graúdo é alta por causa de sua alta porosidade e a densidade é baixa. Quanto ao agregado miúdo, sua granulometria cumpriu com os requisitos da norma ASTM C 33. De acordo com seu módulo de finura é considerada como uma areia média. No entanto, a densidade e absorção são semelhantes ao agregado graúdo. A CV cumpriu com os requisitos mínimos de quantidade de óxidos, onde se somaram 91,1%, o que a classifica como uma CV Classe F; assim como

obteve um índice de atividade resistente de 75% aos 7 dias e de 82% após 28 dias, em conformidade com os requisitos da norma. A densidade da CV é inferior a do cimento e dos agregados, no entanto, encontra-se entre os valores mencionados por Neville, 1998. A CV não satisfez os requisitos de finura para utilização como uma pozolana; Se for observado o ponto marcado na Figura 3, apenas 28,83% tem um tamanho de partícula de 44 micra; no entanto, não foi levada à moagem porque o objetivo foi o de observar o fenômeno da CV nas propriedades mecânicas na sua forma original, sem qualquer modificação em como foi obtida. Quando a CV é usada como adição mineral, uma porcentagem do volume de agregados miúdos é substituído. De acordo com a ASTM C 33, a CV tem muitos finos para ser usada como "agregado"; no entanto, a finura de origem da C.V. proporcionaria um melhor empacotamento para a mistura de concreto. Nas imagens de SEM obtidas (Figura 4), se observa que a CV é formada por partículas esféricas.

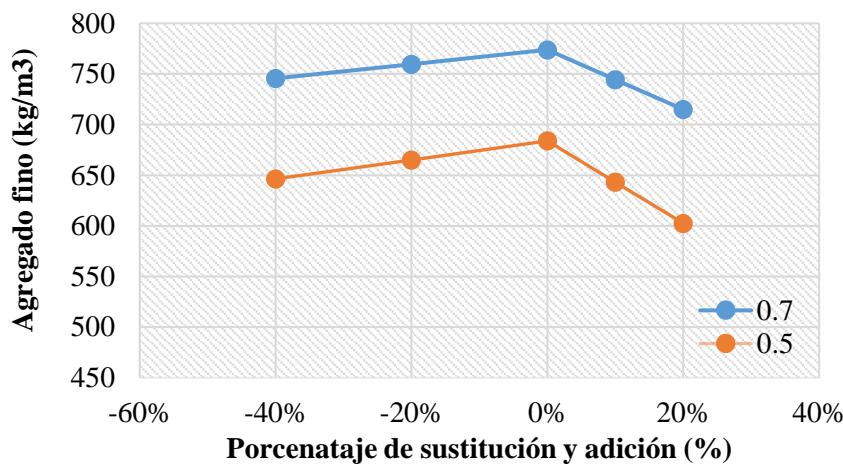


Figura 5. Variação do agregado fino.

Nos estudos de dosagem observou-se uma diminuição na quantidade de agregado miúdo conforme se adicionava CV sem importar se foi por substituição de cimento ou como adição mineral (Figura 5). Isto se deve ao fato da CV ocupar mais volume do que o cimento Portland para atingir o peso de substituição necessário no estudo de dosagem pela diferença de densidades, em seguida, ao ter maior volume de pasta de cimento, se reflete uma redução de volume do agregado fino e, portanto, em seu peso. Assim, a incorporação de CV proporciona uma redução no consumo de matérias primas.

A RC nos corpos de prova de relação a/mc 0,5, o traço ACV-10 RC atingiu uma RC maior do que a proposta pelo ACI 211, que é de 334,4 kg/cm<sup>2</sup> aos 28 dias, as outras amostras não alcançaram o especificado pela norma. Nos corpos de prova com 91 dias de idade, os traços MR, ACV-10 e ACV-20 alcançaram maior RC que a RC objetivo do ACI, no entanto, em comparação com a MR aos 91 dias, nenhum traço com CV obteve uma maior RC.

Nos corpos de prova de relação a/mc de 0,7, todas os traços atingiram a RC proposta pelo ACI 211, de 200 kg/cm<sup>2</sup>, exceto para o SCV-40, aos 28 dias e 91 dias de idade. A CV não melhorou a RC em nenhuma substituição e/ou adição mineral em comparação com os traços de referência, de modo que se pode dizer que os aumentos de RC de 28 a 91 dias são devido ao cimento. Através de uma análise de variância (ANOVA), se buscou uma relação entre a relação a/mc, a porcentagem de substituição ou adição de CV e a idade do concreto para a previsão da RC do concreto (Tabela 10). Foram tomadas como variáveis independentes a idade do concreto, a relação a/c real, a relação de volume de CV/volume total da mistura e a variável dependente foi a RC como se mostra na Tabela 10. Mediante uma regressão múltipla no programa obteve-se a equação 1.

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

Onde:  $f'c$  = RC em  $\text{kg/cm}^2$ , Idade = Idade do concreto em dias,  $a/c$  = Relação a/c real, Vol. C.V. / $\text{m}^3$  = Relação de volume de CV por  $\text{m}^3$ .

Tabela 10. Relação entre a idade do concreto, a relação a/mc, a relaçao a/c real, a relação do volume de CV/volume total do traço e a RC.

Traço	a/mc	idade (dias)	a/c real	Vol C.V/vol total	RC ( $\text{kg/cm}^2$ )	RC calculada ( $\text{kg/cm}^2$ )	Porcentagem de erro (%)
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 a utilização da equação 1, deve-se tomar as seguintes considerações:

- As amostras devem ser feitas com cimento Portland composto 30R e CV classe F.
- As amostras devem ser submetidas a uma cura imersa em água por um período mínimo de 28 dias.
- O concreto deve usar ACTAA com um diâmetro nominal de  $\frac{3}{4}$ ".
- O concreto deve ser dosado de acordo com a recomendação do ACI 211, tendo em conta as alterações na metodologia explicadas e dosadas para um abatimento de 7,5cm - 10cm.

A fim de ter um ponto de comparação, o ME de cada mistura foi determinado com as fórmulas propostas pelas Normas Técnicas Complementares do Regulamento de Construção do Distrito Federal (NTC RDF) para concreto classe 2 e peso volumétrico inferior a  $2200 \text{ kg/m}^3$  (equação 2) as normas de projeto do ACI 318 para concretos com peso volumétrico entre  $1440 \text{ kg/m}^3$  e  $2480 \text{ kg/m}^3$  (equação 3) e uma pesquisa conduzida na Faculdade de Engenharia da Universidade Autónoma de Yucatán (FIUADY) por Hernandez em 2013, que estabelece uma relação entre as densidades dos agregados e a raiz quadrada da RC para prever o ME em concretos com ACTAA, (equação 4). A comparação dos resultados encontra-se na Tabela 11.

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

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

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

Onde: E = ME em kg/cm<sup>2</sup>, Wc = massa específica de concreto fresco em kg/m<sup>3</sup>, f'c = RC em kg/cm<sup>2</sup>, GEAG (adimensional) = massa específica do agregado graúdo (densidade SSS), GEAF (adimensional) = massa específica do agregado miúdo (densidade SSS), f'c (kg/cm<sup>2</sup>) = RC do concreto.

Tabela 11. Comparação dos dados obtidos e outros modelos para determinar o ME.

Traço	a/mc	f'c <sup>1/2</sup>	ME obtido (kg/cm <sup>2</sup> )	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
Diferença entre o módulo de elasticidade obtido e os modelos para determinar o módulo de elasticidade.			>39%	>2%	<5%	

A fim de fazer uma semelhança com a fórmula das NTC- RCDF, se determinou a função de K do ME obtidos em experiências, com uma regressão linear ajustada no programa Microsoft Excel, tendo em conta que para uma f'c = 0, se obteria um valor de ME de 0 (Figura 6). A equação obtida com a regressão linear foi:

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

Onde: E = ME em kg/cm<sup>2</sup>, FC = RC em kg/cm<sup>2</sup>. A equação obtida tem um valor de K 60% maior que o apresentado na norma NTC RDF, o que leva ao superdimensionamento das estruturas de concreto. Por isso, é importante ter uma norma regional de acordo com o tipo de agregado.

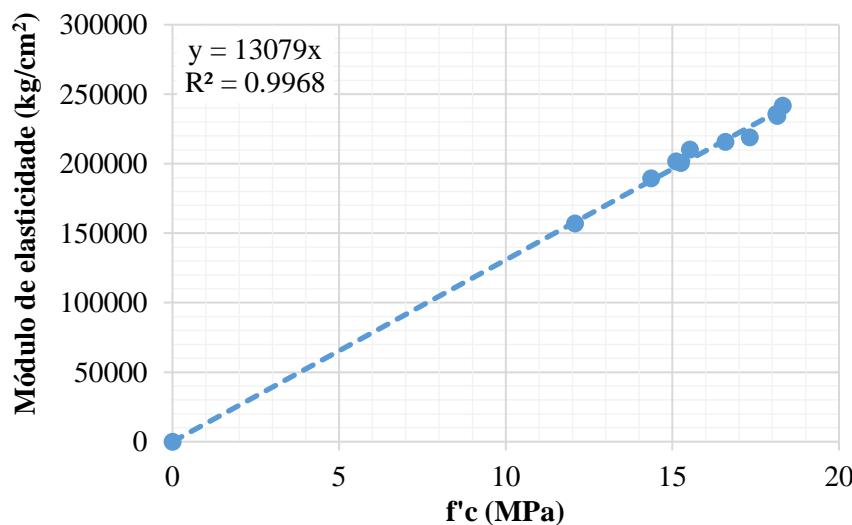


Figura 6. Regressão linear dos resultados.

Os resultados da porosidade, densidade e absorção não variaram significativamente no que diz respeito à incorporação da CV no concreto. No entanto, foi observado um ligeiro aumento na porosidade do concreto conforme se incorporava CV, ver Tabela 9.

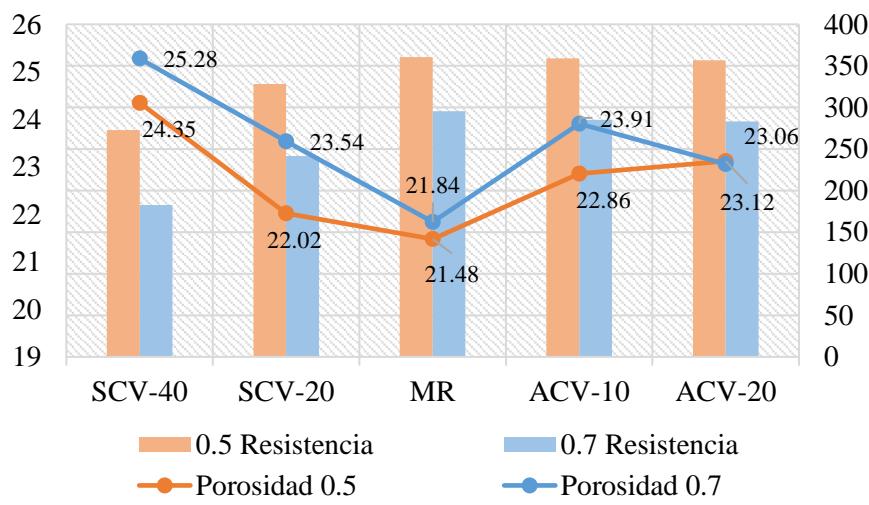


Figura 7. Porosidade e resistência à compressão

A porosidade é um dos principais fatores que afetam a resistência e a durabilidade do concreto, quanto mais poroso for o concreto, menor será a sua resistência mecânica e maior a sua vulnerabilidade a agressividade ambiental (Mehta e Monteiro, 1998). A Figura 7 mostra os resultados de RC do concreto aos 91 dias; os resultados sugerem o seguinte: se observa a tendência de diminuir a RC ao aumentar a porosidade tomando como ponto de referência o traço MR; No entanto, as porcentagens de porosidade não variam mais do que 4%, e a RC dos traços de substituição apresenta uma diminuição significativa da RC em comparação com os resultados das MR. Numa investigação de laboratório da porosidade do concreto com ACTAA (Solis e Moreno, 2011), concluiu-se que o critério da porosidade como um indicativo da qualidade do concreto não foi adequado para ACTAA. Os resultados desta pesquisa em termos de porcentagens de porosidade e sua relação com a RC parecem ratificar o mencionado.

## 5. CONCLUSÕES

A CV classe F da região de Nava, México é recomendada para uso em concreto com ACTAA em forma de agregado miúdo inerte pelas seguintes razões:

- Apesar de não ser capaz de aumentar a RC, esta foi mantida, de modo que a adição de CV pode ser usada como um agregado miúdo inerte.
- Usar a CV como um agregado miúdo inerte no concreto poderia dar espaço para esse material que atualmente só é desperdiçado e afeta a área em torno do lugar.
- De acordo com os resultados das propriedades mecânicas conclui-se que:
- Não foi apresentada atividade pozolânica e, embora as cinzas volantes tivessem satisfeita determinadas exigências para o uso como uma pozolana, não foi suficiente para melhorar a qualidade do concreto com ACTAA. No entanto, se desejar usar a CV de Nava sem qualquer tipo de moagem ou alteração à sua origem, pode-se ajustar o estudo de dosagem usando as Equações 1 e 5 para manter a RC e ME especificadas.
- O modelo da equação 1 e 2 para determinar a RC e ME para concretos com ACTAA foi calculada de modo a evitar o superdimensionamento das estruturas construídas em Yucatan e, assim, otimizar a utilização dos materiais de construção.

Caso ainda assim haja interesse em utilizar a CV. como uma pozolana, recomenda-se alterar a finura da CV. para melhorar o empacotamento do concreto e incentivar a atividade pozolânica.

## 6. AGRADECIMENTOS

Este artigo é dedicado em memória do Dr. Eric Ivan Moreno, QEPD, por ter sido um elemento vital nesta pesquisa e, claro, da Universidade Autônoma de Yucatán, onde foi realizado o estudo experimental. Assim como também se agradece ao Programa Institucional de Promoção e orientação de pesquisa (PRIORI-UADY) pelo financiamento da investigação. Agradecemos também à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Autônoma de Nuevo Leon por fornecer as cinzas volantes e ao projeto Ciência Básica número 155.363 de CONACYT.

## 7. REFERÊNCIAS

- 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.
- Hernandez 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.
- ONCCE (1999), *NMX-C-414-ONCCE-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 Cahún, 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). “Análisis 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.