

# Lowering Carbon Footprint While Achieving Frost-Resistant Concrete

A study of mineral-blended polymeric microsphere powder

by Emmanuel K. Attiogbe, Tara L. Cavalline, and Adam D. Neuwald

**W**ith the growing need to make concrete more environmentally friendly, the concrete industry must facilitate the adoption of technologies that enable the production of mixtures that exhibit reduced embodied carbon yet also satisfy ongoing productivity, strength, and durability requirements. One such technology is a mineral-blended polymeric microsphere powder. While this system provides protection from frost or freezing-and-thawing (F-T) damage as a primary benefit,<sup>1-3</sup> it is not saddled with the uncertainties, such as decreased strength, associated with commonly used surfactant-based air entrainment technologies.<sup>1</sup>

## Background

Compared with non-air-entrained concrete of similar composition, air-entrained concrete requires a higher quantity of portland cement to achieve a specified compressive strength. Estimating that, at a fixed water-cement ratio ( $w/c$ ), a 1% increase in air content yields a 4% decrease in compressive strength, an air-entrained concrete with a 6% air content would have a 16% lower strength than a non-air-entrained concrete with 2% entrapped air content. Such a magnitude of strength loss is supported by test data in Reference 1, which shows 10% and 19% lower strengths for two sets of air-entrained concretes at  $w/c$  values of 0.52 and 0.42, respectively, compared with their companion non-air-entrained concretes (mixtures A1 versus B1, and mixtures A2 versus B2, in Tables 1 and 2 of Reference 1).

It stands to reason that achieving a frost-resistant concrete using an alternative technology to air-entraining admixtures (AEAs) that avoids the strength loss caused by air entrainment would allow for a reduction in cement content and yet achieve the specified compressive strength. Such a reduction in

cement content would yield concrete with a lower carbon footprint.

Test data presented in previous articles<sup>1-3</sup> showed that cyclic F-T-durable, non-air-entrained concretes containing only portland cement as the cementitious material and the mineral-blended polymeric microsphere powder at 1% microspheres by volume of concrete had higher compressive strengths when compared with the strengths of air-entrained concretes having the same cement content and about 6% air content. When the cement contents of the microsphere concretes were reduced by 10%, their compressive strengths were still higher than the strengths of the companion air-entrained concretes with the higher cement contents.<sup>2</sup>

In this article, compressive strength and cyclic F-T test data are presented for microsphere and air-entrained concretes containing fly ash as a supplementary cementitious material (SCM). The concrete mixtures were tested at two levels of cement content and two levels of fly ash content to evaluate the effects of a reduced cement content in combination with an increased fly ash content while maintaining the total cementitious content approximately constant. The standard cyclic F-T testing up to 300 cycles was performed per ASTM C666/C666M, “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing,” Procedure A (Rapid Freezing and Thawing in Water). In addition, the cyclic F-T testing was extended to 900 cycles (three times the maximum number of cycles in the standard test) to determine how well both the microsphere and air-entrained concretes would perform under such a sustained severe exposure.

## Test Program

The concrete mixtures listed in Table 1 were designed based on Mixture A (ID #6192), which is an air-entrained

reference mixture with a 28-day design compressive strength of 28 MPa (4000 psi). The concrete mixtures were prepared with a Type I/II cement and a Class F fly ash. The mixtures had a water-cementitious materials ratio ( $w/cm$ ) of 0.46 and an air-free paste content of 0.32. Mixtures A and B (ID #6193) had a cementitious content of 401 kg/m<sup>3</sup> (675 lb/yd<sup>3</sup>), which consisted of a cement content of 341 kg/m<sup>3</sup> (574 lb/yd<sup>3</sup>) and a 15% fly ash content at 60 kg/m<sup>3</sup> (101 lb/yd<sup>3</sup>). Mixtures C (ID #6194) and D (ID #6195) had a cementitious content of 396 kg/m<sup>3</sup> (667 lb/yd<sup>3</sup>), which, compared with Mixtures A and B, consisted of a 13% lower cement content at 297 kg/m<sup>3</sup> (500 lb/yd<sup>3</sup>) and a higher fly ash content of 25% at 99 kg/m<sup>3</sup> (167 lb/yd<sup>3</sup>).

Both a Type A water-reducing admixture (WRA) and a Type F high-range water-reducing admixture (HRWRA) were used to achieve a 125 to 200 mm (5 to 8 in.) target slump. A commercially available synthetic AEA was used in Mixtures A

and C to achieve a target air content between 6 and 8%, whereas a mineral-blended polymeric microsphere powder<sup>1-3</sup> was used in Mixtures B and D at a microsphere content of 1% by volume.

### Basic tests

For each batch of concrete, air content and unit weight were measured per ASTM C231/C231M, “Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method,” and ASTM C138/C138M, “Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete,” respectively. In addition, the Super Air Meter (SAM) was used to measure air content, unit weight, and SAM number per AASHTO TP 118, “Standard Method of Test for Characterization of the Air-Void System of Freshly Mixed Concrete by the Sequential Pressure Method.” The volumetric air meter was used to measure air content and

**Table 1:**  
Concrete mixture proportions and properties

Constituents and properties	Concrete mixtures				
	A (#6192 - AEA)	B (#6193 - micros.)	C (#6194 - AEA)	D (#6195 - micros.)	
Cement, kg/m <sup>3</sup>	341		297		
Fly ash, kg/m <sup>3</sup>	60		99		
Coarse aggregate, kg/m <sup>3</sup>	1110		1110		
Fine aggregate, kg/m <sup>3</sup>	654	712	653	710	
Water, kg/m <sup>3</sup>	186		184		
$w/cm$	0.46				
AEA, mL/m <sup>3</sup>	51.9	—	53.9	—	
Microsphere content, volume % of concrete	—	1.0	—	1.0	
WRA (Type A), mL/m <sup>3</sup>	1038	1038	1026	1026	
HRWRA (Type F), mL/m <sup>3</sup>	130	195	128	192	
Slump, mm	195	140	190	180	
Air content, volume % of concrete	Type B pressure meter	7.40	2.20	6.80	2.30
	SAM	8.30	3.00	8.30	2.90
	Volumetric air meter	7.25	—	7.00	—
SAM number	0.11	—	0.19	—	
Microsphere content, volume % of concrete	—	0.75	—	1.00	
Density, kg/m <sup>3</sup>	2293	2408	2309	2394	

Note: 1 kg/m<sup>3</sup> = 1.7 lb/yd<sup>3</sup>; 1 mL/m<sup>3</sup> = 0.026 fl oz/yd<sup>3</sup>; 1 mm = 0.04 in.

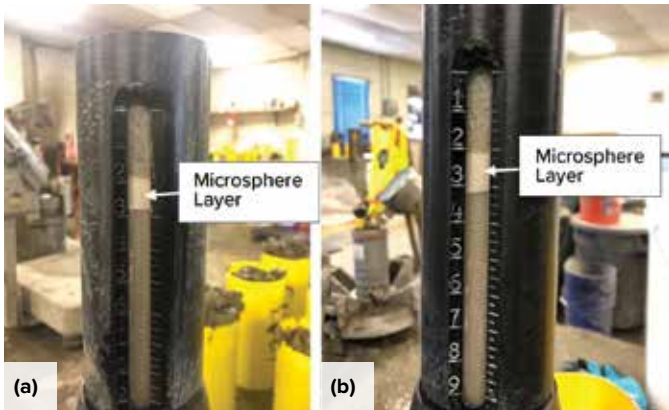


Fig. 1: Microsphere contents of concrete mixtures using volumetric meter: (a) Mixture B; and (b) Mixture D

microsphere content per ASTM C173/C173M, “Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method,” which was modified by omitting the addition of isopropyl alcohol for the microsphere concretes.<sup>1</sup> The results of these tests are shown in Table 1.

Also, three 100 x 200 mm (4 x 8 in.) cylinders were cast for compressive strength testing at 7 and 28 days, and two for testing at 56 days per ASTM C39/C39M, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.”

### Durability tests

For each batch of concrete, three 75 x 100 x 405 mm (3 x 4 x 16 in.) specimens were cast for testing in accordance with ASTM C666/C666M, Procedure A. In addition to measurements of the fundamental transverse frequency, mass loss measurements of the test specimens were also made. Due to the favorable and similar performance of all mixtures after the standard 300 cycles of F-T, the testing was extended to 900 cycles. The measurements were made every 30 cycles for the first 300 cycles and periodically after 300 cycles until the termination of testing at 900 cycles.

### Test Results and Discussion

The fresh property test data in Table 1 show that the densities of the microsphere mixtures were 4 to 5% higher than those of the air-entrained mixtures. The microsphere contents measured with the volumetric meter yielded values of 0.75% and 1.0% for Mixtures B and D, respectively. These measured values, which are reported to the nearest 0.25% as required in the ASTM C173/C173M test, provide a fairly accurate representation of the actual microsphere dosage of 1.0% for both mixtures. Figure 1 shows the microsphere layers observed in the volumetric meter tests for Mixtures B and D. Air contents measured using the volumetric meter were closer to those measured by the pressure meter when compared to the air contents measured by the SAM. The SAM numbers obtained for the two air-entrained mixtures (Mixtures A and C)

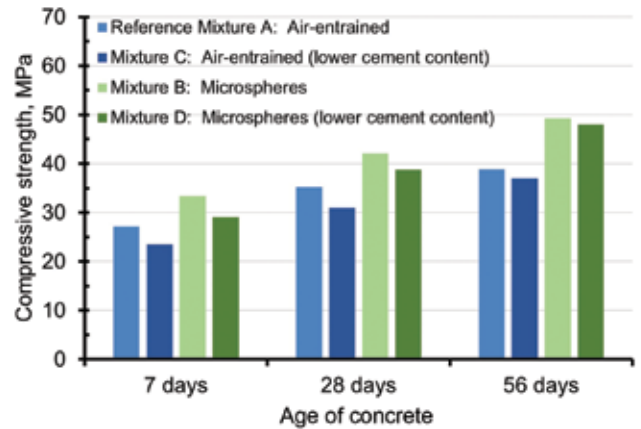


Fig. 2: Average compressive strength results for all mixtures (Note: 1 MPa = 145 psi)

met the recommended maximum number of 0.2.<sup>4</sup>

### Compressive strength

The average compressive strength results in Table 2 and Fig. 2 show that all mixtures met the 28-day target strength of 28 MPa (4000 psi), with both microsphere mixtures, including Mixture D with the lower cement content, meeting the target strength by 7 days. At 28 and 56 days, the reference air-entrained Mixture A had compressive strengths of 35.3 and 38.9 MPa (5120 and 5640 psi), respectively, while the corresponding strengths for the microsphere Mixture D with the lower cement content were 38.8 and 48.0 MPa (5630 and 6960 psi). Therefore, the microsphere Mixture D was 10% and 23% stronger than the reference air-entrained Mixture A at 28 and 56 days, respectively. In contrast, the air-entrained Mixture C with the lower cement content had compressive strengths of 31.0 and 37.0 MPa (4500 and 5370 psi) at 28 and 56 days, respectively, which are 12% and 5% lower than the corresponding strengths for the reference air-entrained Mixture A.

These results show that the use of the microspheres can allow for a reduction in cement content, or for higher replacement levels of cement with fly ash or other SCMs, and yet achieve specified compressive strengths. A 10 to 15% reduction in cement content of concrete is indicated with the use of the microspheres, which is consistent with the findings from a previous study where concrete mixtures containing only portland cement were evaluated.<sup>2</sup> This implies a lowering of the carbon footprint of concrete when the microsphere-powder blend is used as a replacement for air entrainment.

### Cyclic F-T

Table 2 shows that, in line with the findings from previous studies,<sup>1-3</sup> the microsphere concretes with the minimum microsphere content of 1% performed as well as the concretes with about 7 to 8% air contents in the ASTM C666/C666M, Procedure A test. The durability factors are greater than 90% after the standard 300 cycles of testing, far exceeding the

**Table 2:**  
Concrete strength and performance under repeated cycles of F-T

Test results		Concrete mixtures			
		A (#6192 - AEA)	B (#6193 - micros.)	C (#6194 - AEA)	D (#6195 - micros.)
Compressive strength, MPa	7 days	27.1	33.4	23.5	29.1
	28 days	35.3	42.1	31.0	38.8
	56 days	38.9	49.3	37.0	48.0
Durability factor, % ( $\geq 60\%$ )	300 cycles	98.9	94.1	94.3	92.2
	570 cycles	98.4	92.7	93.8	92.7
	630 cycles	96.8	90.3	95.4	87.5
	900 cycles	95.9	81.1	92.3	69.1
Mass loss, %	300 cycles	0.45	0.84	0.25	1.40
	570 cycles	0.84	1.62	0.79	3.02
	630 cycles	1.09	2.01	0.97	3.60
	900 cycles	1.63	3.24	1.58	5.36

Note: 1 MPa = 145 psi

# The NEW ACI Detailing Manual

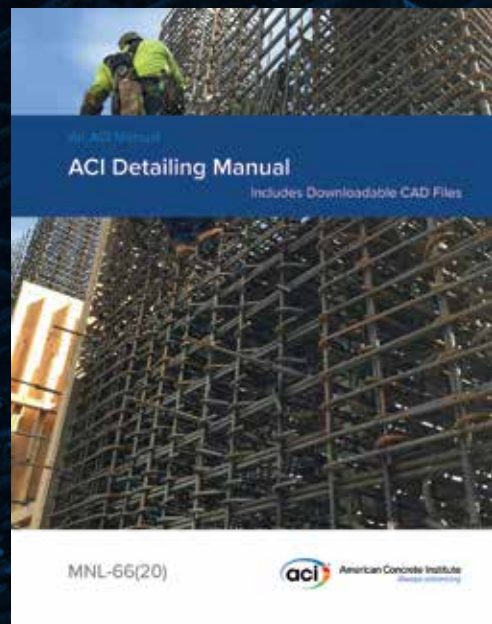
## Includes FREE Downloadable CAD Files

The 2020 edition of the *ACI Detailing Manual* includes many new updates and revisions, plus the addition of valuable downloadable CAD files.

Visit [concrete.org/store](https://concrete.org/store) for more information.



American Concrete Institute  
*Always advancing*



minimum target of 60%. Figure 3, which is a plot of relative dynamic modulus versus the number of F-T cycles, shows that the performance of the four concrete mixtures was similar over the standard 300 cycles of testing. For mixtures with the same cement and fly ash contents, the relative durability factor for the microsphere Mixture B at 300 cycles is 95% when compared with the air-entrained Mixture A, and that for the microsphere Mixture D at 300 cycles is 98% when compared with the air-entrained Mixture C. These relative durability factor values meet the minimum value of 80% per ASTM C260/C260M, “Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete.” Figure 4 shows that the test specimens for both the air-entrained and microsphere concretes had very little surface damage after 300 cycles of rapid F-T in water.

As can be seen in Table 2, all mixtures, including the microsphere Mixture D with the lower cement content, had durability factors greater than 90% until approximately 600 cycles, twice the standard 300 cycles in the ASTM C666/C666M test. The durability factors for all mixtures were still greater than the minimum of 60%, even after 900 cycles of testing.

It should be noted that testing for 900 cycles of F-T is excessive, even for regions that experience long winters with temperature fluctuations about the freezing point, such as the Wet-Freeze climate zone as per Federal Highway

Administration climate zone definitions.<sup>5</sup> States in the U.S. Great Lakes region, which fall within the Wet-Freeze climate zone, have a maximum number of F-T cycles per year in the range of 60 to 100,<sup>6,7</sup> which is far less than the 900 cycles of testing. Therefore, durability factors greater than 90% up to approximately 600 cycles of F-T in water indicate that microsphere concretes with the minimum microsphere content of 1% would have similar performance to air-entrained concretes under the most severe field exposure conditions.

Table 2 shows that the mass losses for all mixtures increased with the number of cycles. The mass losses were quite low up to 300 cycles, with the microsphere Mixture D, which had the maximum allowable fly ash content of 25% for severe to very severe F-T exposure,<sup>8,9</sup> exhibiting the highest mass loss of 1.40%. After the extremely high 900 cycles of F-T, Mixture D exhibited the highest mass loss of 5.36%. Noting that the *w/cm* of the mixtures was 0.46, keeping the *w/cm* below the maximum value of 0.45 for severe to very severe F-T exposure<sup>9-11</sup> would be important to minimize mass loss of microsphere concrete.

### Summary

A test program was carried out to compare the performance of concretes made with the previously described mineral-blended polymeric microsphere powder<sup>1-3</sup> to the performance of air-entrained concretes made with a synthetic AEA. The test results show that at a fixed *w/cm*, use of the microsphere-powder blend in place of air entrainment can allow for a reduction in cement content, or for a higher replacement level of cement with fly ash or other SCMs, and yet achieve specified compressive strength and durability under cyclic F-T. Therefore, the reference air-entrained concrete (Mixture A) can be replaced with a microsphere concrete (Mixture D) having 13% less cement along with an increase in fly ash content from 15 to 25%. The 28- and 56-day compressive strengths of the microsphere concrete were, respectively, 10% and 23% higher than the strengths of the reference air-entrained concrete.

The durability factor for the microsphere concrete was comparable to that of the reference air-entrained concrete, with values greater than 90% up to 300 cycles of rapid F-T in

water. This level of durability for the microsphere concrete was maintained up to approximately 600 cycles, which is twice the standard 300 cycles in the ASTM C666/C666M test.

These results indicate a 10 to 15% reduction in the cement content of concrete with use of the microspheres in place of air entrainment. The study demonstrates that the mineral-blended polymeric microsphere powder is not only as effective as air entrainment in protecting concrete from F-T damage, but is also an effective means of

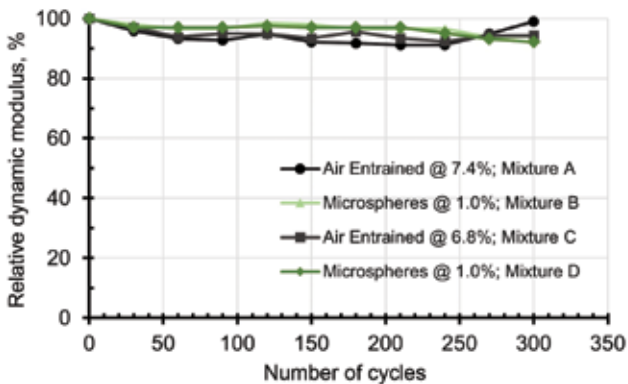


Fig. 3: Relative dynamic modulus versus number of F-T cycles

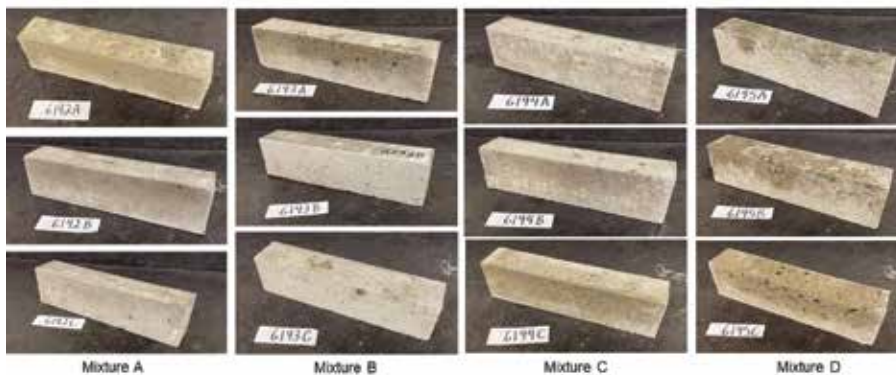


Fig. 4: Concrete specimens after 300 cycles of rapid F-T per ASTM C666/C666M, Procedure A

lowering the carbon footprint of concrete.

## Acknowledgments

The concrete mixtures were prepared and the compressive strength testing was performed at the facilities of Concrete Supply Co., Charlotte, NC, USA, under the leadership of Adam Neuwald, Director of Technical Services. The freezing-and-thawing testing was performed at the Department of Engineering Technology and Construction Management, University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, under the leadership of Tara Cavalline, Associate Professor. The polymeric microsphere product was supplied by CEM Innovations, LLC, Pleasanton, CA, USA. Special thanks to the laboratory personnel at Concrete Supply Co. and the University of North Carolina at Charlotte for their support of the project.

## References

1. Attiogbe, E.K., "A New Way to Deliver Protection from Freezing-and-Thawing Damage," *Concrete International*, V. 43, No. 1, Jan. 2021, pp. 27-33.
2. Attiogbe, E.K., "Microspheres in Hardened Concrete," *Concrete International*, V. 44, No. 3, Mar. 2022, pp. 43-50.
3. Attiogbe, E.K., "Compliance Concept in Protection of Concrete from Freezing-and-Thawing Damage," *ACI Materials Journal*, V. 117, No. 6, Nov. 2020, pp. 187-200.
4. Ley, T.M.; Welch, D.; Peery, J.; and LeFlore, J., "Determining the Air-Void Distribution in Fresh Concrete with the Sequential Air Method," *Construction and Building Materials*, V. 150, Sept. 2017, pp. 723-737.
5. You, Z.; Gilbertson, C.; and Van Dam, T., "Identifying Best Practices in Pavement Design, Materials, Construction, and Maintenance in Wet-Freeze Climates Similar to Michigan," *Report No: SPR-1666*, Michigan Technological University, Department of Civil and Environmental Engineering, Houghton, MI, Feb. 2018, 147 pp.
6. "Freeze-Thaw Cycles," Great Lakes Integrated Sciences and Assessments, Ann Arbor, MI, <https://glisa.umich.edu/resources-tools/climate-impacts/freeze-thaw-cycles/>. (Last accessed Mar. 15, 2023)
7. Haley, J.S., "Climatology of Freeze-Thaw Days in the Conterminous United States: 1982-2009," Master of Arts Thesis, Department of Geography, Kent State University, Kent, OH, May 2011, 75 pp.
8. Thomas, M., *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*, IS548, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2007, 24 pp.
9. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19) (Reapproved 2022)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 624 pp.
10. ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete (ACI 201.2R-16)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2016, 84 pp.
11. ACI Committee 350, "Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350-20) and Commentary (ACI 350R-20)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 544 pp.

Note: Additional information on the ASTM and AASHTO standards discussed in this article can be found at [www.astm.org](http://www.astm.org) and [www.transportation.org](http://www.transportation.org), respectively.

Selected for reader interest by the editors.



**Emmanuel K. Attiogbe, F.A.C.I.**, is a Research Engineer in private practice in Discovery Bay, CA, USA. He retired in 2016 as Head of Innovation for the development of alternative reinforcements for concrete at BASF Construction Chemicals, now Master Builders Solutions. He is a past Chair of the TAC Technology Transfer Committee

and the Technology Transfer Advisory Group of the ACI Foundation's Strategic Development Council (now reorganized as the Concrete Innovation Council) and a past member of the ACI Board of Direction. He is a member of several ACI committees and the ACI Foundation's Concrete Research Council. He was awarded the 2021 ACI Wason Medal for Most Meritorious Paper, the 2015 ACI Henry L. Kennedy Award, and the 1995 ACI Wason Medal for Materials Research. He received his BSc in civil engineering from the Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi, Ghana, and his MS and PhD in civil engineering from the University of Kansas, Lawrence, KS, USA.



ACI member **Tara L. Cavalline** is an Associate Professor in the Department of Engineering Technology and Construction Management at the University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, NC, USA, where she has been a faculty member since 2006. She is currently Secretary of ACI Committee 555, Concrete with Recycled Materials, and Chair of Subcommittee ACI 201-J, Chemical Attack on Concrete. She also serves as a member of several other ACI committees, including the Educational Activities Committee; 121, Quality Assurance; 201, Durability of Concrete; and S801, Student Competitions. Her research interests include durable and sustainable concrete, quality assurance for concrete construction, and asset management. Cavalline is also the Chair of the Transportation Infrastructure Group for the Transportation Research Board. She received her BS and MS in civil engineering from the Pennsylvania State University, University Park, PA, USA, and her PhD in infrastructure and environmental systems from the University of North Carolina at Charlotte.



ACI member **Adam D. Neuwald** is Director of Technical Services at Concrete Supply Co., Charlotte, NC, USA. He is a member of ASTM International Committee C09, Concrete and Concrete Aggregates, and the National Ready Mixed Concrete Association Research, Engineering, and Standards Committee. He received his BS in civil engineering from Purdue

University, West Lafayette, IN, USA.

# Reducción de la huella de carbono mientras se logra un concreto resistente al congelamiento

*Un estudio de polvo de microesferas poliméricas mezclada con minerales*

*por Emmanuel K. Attiogbe, Tara L. Cavalline, y Adam D. Neuwald*

Ante la creciente necesidad de hacer que el concreto sea más amigable con el medio ambiente, la industria del concreto debe facilitar la adopción de tecnologías que permitan la producción de mezclas que exhiban una reducción del carbono incorporado y a la vez satisfagan los requisitos continuos de productividad, resistencia y durabilidad. Una de estas tecnologías es un polvo de microesferas poliméricas mezcladas con minerales. Si bien este sistema proporciona protección contra congelamiento y descongelamiento (F-T por sus siglas en inglés) como beneficio principal,<sup>1-3</sup> no está lleno de las incertidumbres, como la disminución de la resistencia, asociadas con los aditivos incorporadores de aire comúnmente utilizados.<sup>1</sup>

## Antecedentes

En comparación con un concreto de composición similar sin aire incorporado, el concreto con aire incorporado requiere una mayor cantidad de cemento portland para lograr una resistencia a la compresión especificada. Estimando que, a una relación agua-cemento fija (w/c), un aumento del 1% en el contenido de aire produce una disminución del 4% en la resistencia a la compresión, un concreto con un 6% de aire incorporado tendría una resistencia 16% menor que un concreto sin aire incorporado con un contenido de aire del 2% de aire atrapado. Tal magnitud en la pérdida de resistencia está soportada por los datos mostrados en la Referencia 1, que muestran resistencias 10% y 19% más bajas para dos grupos de concretos con aire incorporado a valores w/c de 0,52 y 0,42, respectivamente, en comparación con mezclas de concreto complementarias sin aire incorporado (mezclas A1 versus B1, y mezclas A2 versus B2, en las Tablas 1 y 2 de la Referencia 1).

Es lógico pensar que lograr un concreto resistente al congelamiento utilizando una tecnología alternativa a los aditivos incorporadores de aire (AIA) que evitan la pérdida de resistencia

causada por éstos, permitiría una reducción en el contenido del cemento, aún así logrando la resistencia a la compresión especificada. Tal reducción de contenido de cemento produciría concreto con una menor huella de carbono.

Los datos de ensayos presentados en artículos anteriores<sup>1-3</sup> mostraron que los concretos resistentes a ciclos F-T, sin aditivos incorporadores de aire empleando solo cemento portland como material cementante y el polvo de microesfera polimérica mezclada con minerales al 1% de microesferas por volumen de concreto, tenían mayores resistencias a la compresión que concretos con el mismo contenido de cemento y aproximadamente 6% de contenido de aire. Cuando el contenido de cemento de los concretos con microesferas se redujo en un 10%, sus resistencias a la compresión fueron aún más altas que las resistencias de los concreto en los que se utilizaron aditivos incorporadores de aire con contenidos de cemento más altos.<sup>2</sup>

En este artículo, se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión y ciclos de congelamiento y descongelamiento para concretos con microesferas y concretos con aire incorporados, que contienen cenizas volantes como material cementicio suplementario (SCM). Las mezclas de concreto se evaluaron en dos niveles de contenido de cemento y dos niveles de contenido de cenizas volantes para evaluar los efectos de un contenido reducido de cemento en combinación con un mayor contenido de cenizas volantes, manteniendo el contenido total de cemento aproximadamente constante. Se realizó de la prueba cíclica estándar de congelamiento-descongelamiento hasta 300 ciclos según ASTM C666 / C666M, "Método de prueba estándar para la resistencia del concreto a congelamiento y descongelamiento rápido", Procedimiento A (congelamiento y descongelamiento rápidos en agua). Adicionalmente, la prueba cíclica F-T se extendió a 900 ciclos (tres veces el máximo número de ciclos definidos en la prueba estándar) para determinar qué tan bien funcionarían los concretos, tanto con microesferas como con aire incorporado, sometidos a una exposición tan severa.

## Programa de prueba

Las mezclas de concreto enumeradas en la Tabla 1 se diseñaron con base a la Mezcla A (ID # 6192), que es una mezcla de referencia con aire incorporado y una resistencia a la compresión de diseño a 28 días de 28 MPa (4000 psi). Las mezclas de concreto se prepararon con un cemento Tipo I/II y una ceniza volante Clase F. Las mezclas tenían una relación agua- material cementante (a/cm) de 0,46 y un contenido de pasta libre de aire de 0,32. Las mezclas A y B (ID #6193) tenían un contenido de cementante de 401 kg/m<sup>3</sup> (675 lb/yd<sup>3</sup>), que consistía en un contenido de cemento de 341 kg/m<sup>3</sup> (574 lb/yd<sup>3</sup>) y un 15% de contenido de cenizas volantes con 60 kg/m<sup>3</sup> (101 lb/yd<sup>3</sup>). Las mezclas C (ID #6194) y D (ID #6195) tenían un contenido de cementante de 396 kg/m<sup>3</sup> (667 lb/yd<sup>3</sup>), que, en comparación con las mezclas A y B, consistían en un contenido de cemento 13% menor con 297 kg/m<sup>3</sup> (500 lb/yd<sup>3</sup>) y un mayor contenido de cenizas volantes del 25% equivalente a 99 kg/m<sup>3</sup> (167 lb/yd<sup>3</sup>).

Se usaron tanto aditivos reductores de agua tipo A (WRA) como reductores de agua de alto rango tipo F (HRWRA) para lograr los asentamientos proyectados de 125 a 200 mm (5 a 8 pulgadas). En las mezclas A y C se utilizaron aditivos incorporados de aire sintéticos disponibles comercialmente para lograr contenidos de aire entre 6 y 8%, mientras que en las mezclas B y D se utilizó un polvo de microesferas poliméricas mezcladas con minerales<sup>1-3</sup> con un contenido de microesferas del 1% en volumen.

## Ensayos básicos

Para cada lote de concreto, el contenido de aire y el peso unitario se midieron según ASTM C231 / C231M, "Método de Ensayo Normalizado para Determinar el Contenido de Aire del Concreto Fresco Recién Mezclado por el Método de Presión" y ASTM C138/C138M, "Método de Ensayo Normalizado de Densidad (Peso Unitario), Rendimiento, y Contenido de Aire (Gravimétrico) del Concreto", respectivamente. Adicionalmente,

el Super Air Meter (SAM) se utilizó para medir el contenido de aire, el peso unitario y el número SAM según AASHTO TP 118, "Método de Ensayo Normalizado Para la Caracterización del Sistema Aire-Vacíos de Concreto Fresco por el método de Presión Secuencial". El medidor de aire volumétrico se utilizó para medir el contenido de aire y contenido de microesferas según ASTM C173 / C173M, "Método de Ensayo Normalizado para Determinar el Contenido de Aire del Concreto Fresco Recién Mezclado por el Método Volumétrico", que se modificó omitiendo la adición de alcohol isopropílico para los concretos de microesfera.<sup>1</sup> Los resultados de estos ensayos se muestran en la Tabla 1.

Además, se fundieron tres cilindros de 100 x 200 mm (4 x 8 pulgadas) para pruebas de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, y dos para pruebas a los 56 días según ASTM C39 / C39M, "Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto."



## Pruebas de durabilidad

Para cada lote de concreto, se elaboraron tres muestras de 75 x 100 x 405 mm (3 x 4 x 16 pulg.) para ensayarse de acuerdo con ASTM C666/C666M, Procedimiento A. Además de las mediciones de la frecuencia transversal fundamental, también se realizaron mediciones de pérdida de masa de los especímenes de prueba. Debido al desempeño favorable y similar de todas las mezclas después de los 300 ciclos estándar de F-T, la prueba se extendió a 900 ciclos. Las mediciones se realizaron cada 30 ciclos durante los primeros 300 ciclos y periódicamente después de 300 ciclos hasta la finalización de la prueba a 900 ciclos.

Constituyentes y propiedades		Mezclas de concreto			
		A (#6192 - AIA)	B (#6193 - micros.)	C (#6194 - AIA)	D (#6195 - micros.)
Cemento, kg/m <sup>3</sup>		341		297	
Cenizas volantes, kg/m <sup>3</sup>		60		99	
Agregado grueso, kg/m <sup>3</sup>		1110		1110	
Agregado fino, kg/m <sup>3</sup>		654	712	653	710
Agua, kg/m <sup>3</sup>		186		184	
a/cm		0.46			
AIA, ml/m <sup>3</sup>		51.9	—	53.9	—
Contenido de microesferas, % en volumen de concreto		—	1.0	—	1.0
WRA (Tipo A), ml/m <sup>3</sup>		1038	1038	1026	1026
HRWRA (Tipo F), ml/m <sup>3</sup>		130	195	128	192
Asentamiento, mm		195	140	190	180
Contenido de aire, % en volumen de concreto	Método de presión – tipo B	7,40	2,20	6,80	2,30
	SAM	8,30	3,00	8,30	2,90
	Ensayo volumétrico	7,25	—	7,00	—
Número SAM		0,11	—	0,19	—
Contenido de microesferas, % en volumen de concreto	Ensayo volumétrico	—	0,75	—	1,00
Densidad, kg/m <sup>3</sup>		2293	2408	2309	2394

Nota: 1 kg/m<sup>3</sup> = 1.7 lb/yd<sup>3</sup>; 1 ml/m<sup>3</sup> = 0.026 fl oz/yd<sup>3</sup>; 1 mm = 0.04 in.

## Resultados de las pruebas y discusión

Los datos de las propiedades en estado fresco en la Tabla 1 muestran que las densidades de las mezclas con microesferas fueron de 4 a 5% más altas que las de las mezclas con aire incorporado. Los contenidos de microesfera medidos con el medidor volumétrico arrojaron valores de 0,75% y 1,0% para las mezclas B y D, respectivamente. Estos valores medidos, que se reportan con una precisión del 0,25% como se requiere en la prueba ASTM C173 / C173M, proporcionan una representación bastante precisa de la dosis de microesferas del 1,0% para ambas mezclas. La Figura 1 muestra las capas de microesferas observadas en las pruebas del medidor volumétrico para las mezclas B y D. Los contenidos de aire medidos con el medidor volumétrico fueron más cercanos a los medidos por el medidor de presión en comparación con los contenidos de aire medidos por el SAM. Los números SAM obtenidos para las dos mezclas con aire incluido (mezclas A y C) cumplieron con el número máximo recomendado de 0,2.<sup>4</sup>

## Resistencia a la compresión

El promedio de los resultados de resistencia a la compresión en la Tabla 2 y Figura 2 muestran que todas las mezclas alcanzaron la resistencia objetivo de 28 MPa (4000 psi) a los 28 días, con ambas mezclas de microesferas, incluida la mezcla D con el menor contenido de cemento, cumpliendo la resistencia objetivo en 7 días. A los 28 y 56 días, la mezcla de referencia A con aire incorporado tenía resistencias a la compresión de 35,3 y 38,9 MPa (5120 y 5640 psi), respectivamente, mientras que las resistencias correspondientes a la mezcla D con microesferas y menor contenido de cemento eran 38,8 y 48,0 MPa (5630 y 6960 psi). Por lo tanto, la mezcla D con microesferas fueron entre un 10% y un 23% más resistentes que la mezcla de referencia A con aire incorporado a los 28 y 56 días, respectivamente. En comparación, la Mezcla C con un menor contenido de cemento y aire incorporado tuvo resistencias a la compresión de 31,0 y 37,0 MPa (4500 y 5370 psi) a los 28 y 56 días, respectivamente, que son 12% y 5% más bajas que las resistencias correspondientes para la Mezcla A de referencia.

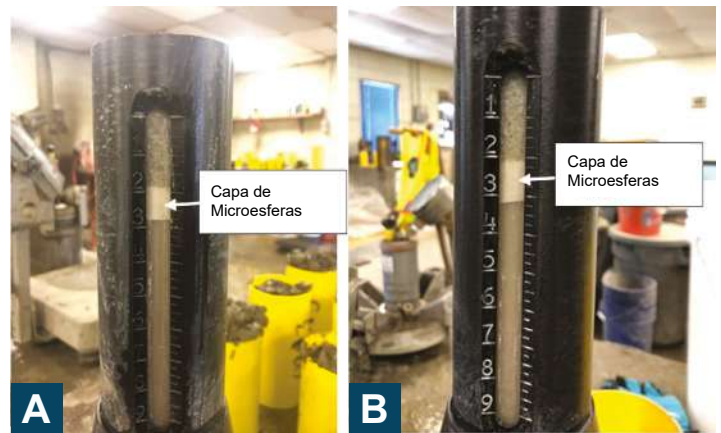


Fig. 1: Contenido de microesferas en mezclas de concreto utilizando medidor volumétrico: a) Mezcla B; y b) Mezcla D.

Estos resultados muestran que el uso de las microesferas puede permitir una reducción en el contenido de cemento, o mayores niveles de reemplazo de cemento con cenizas volantes u otros cementantes suplementarios, y aun así lograr las resistencias a la compresión especificadas. Se indica una reducción del 10 al 15% en el contenido de cemento del concreto con el uso de las microesferas, lo que es consistente con los hallazgos de un estudio anterior en el que se evaluaron mezclas de concreto que contenían solo cemento portland.<sup>2</sup> Esto implica una reducción de la huella de carbono del concreto cuando la mezcla de polvo de microesferas se utiliza como reemplazo del aditivo incorporador de aire.

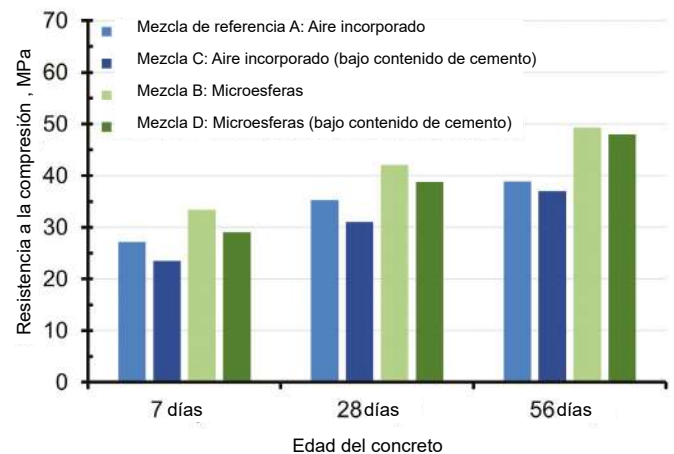
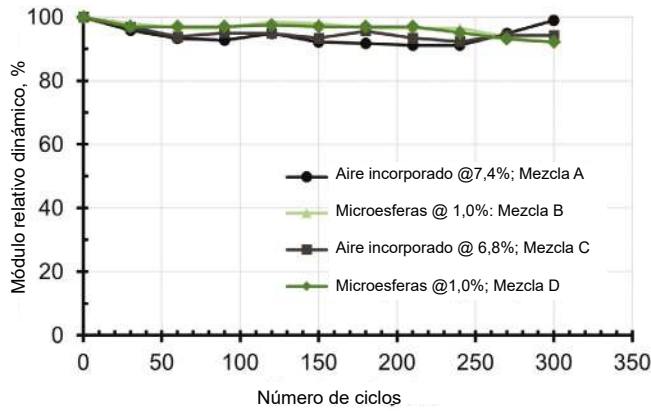


Fig. 2: Resultados de resistencia a la compresión para las mezclas (nota: 1 MPa=145 psi)

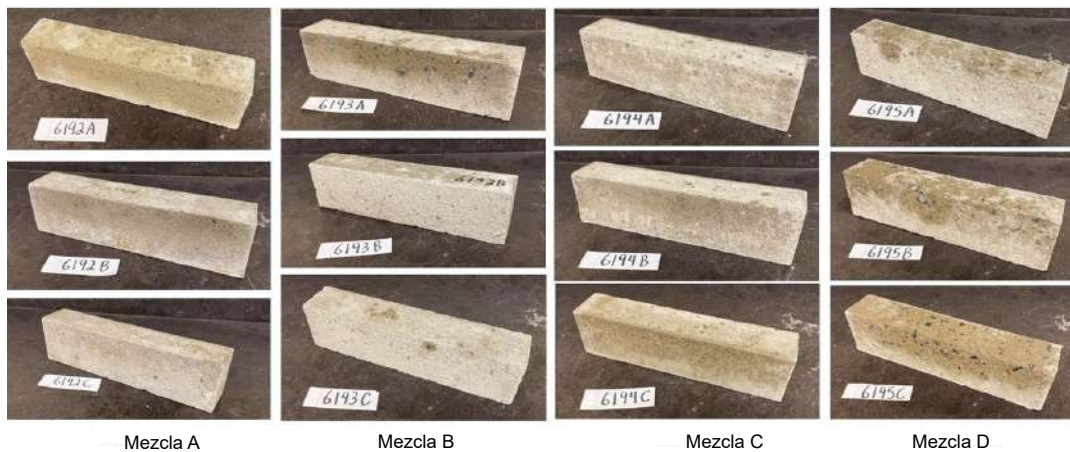
## Ensayos cíclicos de congelamiento y descongelamiento (F-T)



**Figura 3. Módulo dinámico relativo versus número de ciclos F-T.**

para las cuatro mezclas después de 300 ciclos. Al comparar mezclas con el mismo contenido de cemento y de ceniza volante después de 300 ciclos, el factor de durabilidad relativa comparado con la mezcla de referencia A es de 95% para la mezcla con microesferas y, para la mezcla D con microesferas es 98% al ser comparada con la mezcla C que tiene aditivo incorporador de aire. Estos factores de durabilidad relativa cumplen con el valor mínimo de 80% según norma ASTM C260/C260M “Especificación Estándar para Aditivos Incorporadores de Aire para Concreto.” La Figura 4 muestra que los especímenes tanto con aire incorporado como con microesferas sufrieron poco daño tras 300 ciclos de congelamiento y descongelamiento rápido en agua.

Como se puede observar en la Tabla 2, todas las mezclas, incluyendo la mezcla D con microesferas y bajo contenido de cemento, tuvieron factores de durabilidad superiores al 90% hasta aproximadamente 600 ciclos, que es el doble de los 300 ciclos estándar definidos en ASTM C666/C666M. Los factores de durabilidad para todas las mezclas fueron incluso superiores al mínimo de 60%, incluso después de 900 ciclos de ensayo.



**Figura 4. Muestras de concreto después de 300 ciclos de F-T rápido según ASTM C666M, Procedimiento A**

Se puede observar que ensayos por 900 ciclos de congelamiento-descongelamiento son excesivos, incluso para regiones que experimentan largos inviernos con fluctuaciones de temperatura alrededor del punto de congelamiento, como las zonas de congelamiento húmedo definidos por el Federal Highway Administration.<sup>5</sup> Los estados de Estados Unidos alrededor de los Grandes Lagos, que caen en la mencionada zona, experimentan ciclos anuales en el rango de 60 a 100,<sup>6,7</sup> que es muy inferior a los 900 ciclos ensayados. Por tanto, factores de durabilidad mayores al 90% en casi 600 ciclos de congelamiento y descongelamiento en agua indican que los concretos con microesferas al 1% tendrían un desempeño similar al de concretos con aire incorporado bajo las condiciones de exposición más severas en campo.

La Tabla 2 muestra que la pérdida de masa incrementa en función del número de ciclos. La pérdida de masa fue bastante hasta los 300 ciclos, siendo la Mezcla D con microesferas que tenía el mayor reemplazo de ceniza volante del 25% para condiciones de exposición severas de congelamiento y descongelamiento,<sup>8,9</sup> mostrando la mayor pérdida de masa del 1,40%. Después los elevados 900 ciclos de congelamiento-descongelamiento, la Mezcla D mostró la mayor pérdida de masa con 5,36%. Es importante notar que la relación agua-material cementante de las mezclas fue de 0,46. Manteniendo la relación a/cm bajo el límite máximo de 0,45 para exposiciones severas o muy severas de congelamiento y descongelamiento,<sup>9-11</sup> sería importante para minimizar la pérdida de masa para concretos con microesferas.

## Resumen

Se llevó a cabo un programa de ensayos para comparar el desempeño de concretos elaborados con el previamente descrito polvo de microesferas poliméricas mezclada con minerales con el desempeño del concreto con aire incorporado fabricados con aditivos incorporadores de aire sintéticos (AEA). Los resultados muestran que para una relación a/cm constante, el uso del polvo de microesferas en lugar de aditivo incorporador de aire puede permitir una reducción en el contenido de cemento, o una mayor reducción de cemento

por ceniza volante u otro material cementante suplementario, y aun así lograr la resistencia a la compresión de diseño y durabilidad a ciclos de congelamiento y descongelamiento. Por lo tanto, la mezcla de referencia con aire incorporado (Mezcla A) puede ser reemplazada por una con microesferas (Mezcla D) que tiene un 13% menos de cemento, así como un incremento en la ceniza volante del 15 al 25%. La resistencia a la compresión a los 28 y 56 días para el concreto con microesferas fue 10% y 23% mayor, que la resistencia para los concretos con aire incorporado.

El factor de durabilidad para el concreto con microesferas fue comparable al del concreto con aire incorporado, con valores superiores al 90% después de 300 ciclos de congelamiento-descongelamiento rápido en agua. Este nivel de durabilidad de los concretos con microesferas se mantuvo hasta los 600 ciclos, que es el doble del estándar de 300 ciclos definidos en el ASTM C66/C666M.

Los resultados indican una reducción del 10 y 15% del contenido de cemento en el concreto con el uso de microesferas en lugar de aditivos incorporadores de aire. El estudio muestra que el polvo de microesferas poliméricas mezclada con minerales es efectivo no solo para proteger al concreto de ciclos de congelamiento y descongelamiento, sino también como una forma de reducir la huella de carbono.

## Agradecimientos

Las mezclas de concreto se prepararon y las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron en las instalaciones de Concrete Supply Co., Charlotte, NC, EE.UU., bajo la dirección de Adam Neuwald, Director de Servicios Técnicos. Las pruebas de congelamiento y descongelamiento se realizaron en el Departamento de Tecnología de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Universidad de Carolina del Norte en Charlotte, Charlotte, bajo la dirección de Tara Cavalline, Profesora Asociada. El producto de microesferas poliméricas fue suministrado por CEM Innovations, LLC, Pleasanton, CA, USA. Un agradecimiento especial al personal de laboratorio de Concrete Supply Co. y la Universidad de Carolina del Norte en Charlotte por su apoyo al proyecto.

## Referencias

1. Attiogbe, E.K., "A New Way to Deliver Protection from Freezing-and-Thawing Damage," Concrete International, V. 43, No. 1, Jan. 2021, pp. 27-33.
2. Attiogbe, E.K., "Microspheres in Hardened Concrete," Concrete International, V. 44, No. 3, Mar. 2022, pp. 43-50.
3. Attiogbe, E.K., "Compliance Concept in Protection of Concrete from Freezing-and-Thawing Damage," ACI Materials Journal, V. 117, No. 6, Nov. 2020, pp. 187-200.
4. Ley, T.M.; Welchel, D.; Peery, J.; and LeFlore, J., "Determining the Air-Void Distribution in Fresh Concrete with the Sequential Air Method," Construction and Building Materials, V. 150, Sept. 2017, pp. 723-737.
5. You, Z.; Gilbertson, C.; and Van Dam, T., "Identifying Best Practices in Pavement Design, Materials, Construction, and Maintenance in Wet-Freeze Climates Similar to Michigan," Report No: SPR-1666, Michigan Technological University, Department of Civil and Environmental Engineering, Houghton, MI, Feb. 2018, 147 pp.
6. "Freeze-Thaw Cycles," Great Lakes Integrated Sciences and Assessments, Ann Arbor, MI, <https://glisa.umich.edu/resources-tools/climate-impacts/freeze-thaw-cycles/>. (Last accessed Mar. 15, 2023)
7. Haley, J.S., "Climatology of Freeze-Thaw Days in the Conterminous United States: 1982-2009," Master of Arts Thesis, Department of Geography, Kent State University, Kent, OH, May 2011, 75 pp.
8. Thomas, M., Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete, IS548, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2007, 24 pp.
9. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19) (Reapproved 2022)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 624 pp.
10. ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete (ACI 201.2R16)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2016, 84 pp.
11. ACI Committee 350, "Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350-20) and Commentary (ACI 350R-20)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 544 pp



**Adam D. Neuwald** es director de Servicios Técnicos en Concrete Supply Co., Charlotte, NC, Estados Unidos. Es miembro del Comité Internacional C09 de ASTM, Concreto y Agregados de Concreto, y del Comité de Investigación, Ingeniería y Estándares de la Asociación Nacional de Concreto Premezclado. Recibió su Licenciatura en ingeniería civil de la Universidad de Purdue, West Lafayette, IN, USA.



**Tara L. Cavalline** es miembro del ACI y Profesora Asociada en el Departamento de Tecnología de Ingeniería y Gestión de la Construcción en la Universidad de Carolina del Norte en Charlotte, Charlotte, NC, EE.UU., donde ha sido miembro de la facultad desde 2006. Actualmente es secretaria del Comité ACI 555, Concreto con Materiales Reciclados, y presidente del Subcomité ACI 201-J, Ataque químico al concreto. También se desempeña como miembro de varios otros comités de ACI, incluido el Comité de Actividades Educativas; 121, Control de calidad; 201, Durabilidad del concreto; y S801, Competiciones estudiantiles. Sus intereses de investigación incluyen concreto duradero y sostenible, control de calidad para la construcción de concreto y gestión de activos. Cavalline también preside el Grupo de Infraestructura de Transporte para la Junta de Investigación de Transporte. Recibió su licenciatura y maestría en ingeniería civil de la Universidad Estatal de Pensilvania, University Park, PA, EE.UU., y su doctorado en infraestructura y sistemas ambientales de la Universidad de Carolina del Norte en Charlotte.



**Emmanuel K. Attiogbe**, FACI, es un Ingeniero de Investigación independiente en Discovery Bay, CA, Estados Unidos. Se retiró en 2016 como Jefe de Innovación para el desarrollo de refuerzos alternativos para concreto en BASF Construction Chemicals, ahora Master Builders Solutions. En el pasado fue el presidente del Comité para Transferencia de Tecnología (TAC) y del el Grupo Asesor de Transferencia de Tecnología del Consejo de Desarrollo Estratégico de la Fundación ACI (ahora reorganizado como el Consejo de Innovación Concreta) y ex miembro de la Junta Directiva de ACI. Es miembro de varios comités de ACI y del Consejo de Investigación del Hormigón de la Fundación ACI. Fue galardonado con la Medalla ACI Wason 2021 al Artículo Más Meritorio, el Premio ACI Henry L. Kennedy 2015 y la Medalla ACI Wason 1995 para Investigación de Materiales. Recibió su licenciatura en ingeniería civil de la Universidad de Ciencia y Tecnología Kwame Nkrumah, Kumasi, Ghana, y su maestría y doctorado en ingeniería civil de la Universidad de Kansas, Lawrence, KS, EE.

**La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Colombia**

*Título: Reducción de la huella de carbono mientras se logra un concreto resistente al congelamiento. Un estudio de polvo de microesferas poliméricas mezclada con minerales*



*Traductor y Revisor Técnico:  
Gonzalo E. Gallo E., PhD*