

A New Way to Deliver Protection from Freezing-and-Thawing Damage

Blending microspheres with mineral powder minimizes agglomeration and ensures durability

by Emmanuel K. Attiogbe

Air entrainment has long been known as an effective means for protecting concrete from cyclic freezing-and-thawing (F-T) damage; air voids in the matrix provide spaces for ice crystals to grow and thereby relieve internal tensile stresses that can cause cracking of the concrete. Air bubbles are entrained in fresh concrete by the mechanical action of mixing the ingredients, and they are stabilized by using a surfactant, known in the industry as an air-entraining agent (AEA). However, the amount of stable air that is entrained can be controlled only indirectly through the adjustment of the amount or type of AEA added to the concrete. Further, researchers have found that AEAs may not be effective if they do not support the generation of a consistent spacing of air voids in the concrete. Many producers encounter difficulties in achieving consistent void spacing because the effectiveness of surfactants is affected by the ambient environment and the mixture constituents. Hence, it is desirable to have an alternative to air entrainment in which void structures are incorporated into concrete without requiring air bubbles to be stabilized during mixing. This has led to the development of technologies such as those that comprise hollow-core polymeric microspheres.¹⁻⁵

A recent study provides a micromechanics-based explanation of how such microspheres protect concrete from F-T damage.⁶ Commercially available hollow-core microspheres have polymeric walls and inner spaces filled with a liquid or a gas. The polymer shell and the filler materials have high rates of thermal expansion and contraction, enabling the microspheres to contract relative to the concrete during temperature drops. This differential contraction creates a spherical void between the microsphere and the concrete surface that was formed by the microsphere when the concrete set.

One type of microsphere known to protect concrete from damage due to cyclic F-T is trademarked Expancel®. This product is available in two forms:

- Gas-filled, wet-expanded microspheres in a wet foam or slurry form; or
- Gas-filled, dry-expanded microspheres in dry powder form.

In both forms, the microspheres have low densities, and they tend to adhere to each other and form agglomerations. This particle agglomeration is detrimental to performance because the microspheres must be uniformly dispersed throughout the concrete to protect the concrete from damage during cyclic F-T. Further, microspheres supplied as dry powder are difficult to handle, as the dry powder causes dusting. While the latter issue implies that the wet-expanded microspheres in slurry form would be preferred for use in concrete, the slurry creates challenges in concrete production because the very low-density microspheres segregate from the liquid medium during storage. To overcome this inherent instability, the slurry is best produced at the point of addition into the concrete.³ This leads to high production and logistics costs that have stifled the introduction of the microsphere technology into general practice.

This article presents test data that show the effectiveness of a new method of delivery of microspheres into concrete. The new method is based on a microsphere-powder blend that eliminates or minimizes particle agglomeration and eases handling and delivery of the microspheres into concrete mixtures. Test data are provided to show the effectiveness of the delivered microspheres in protecting concrete from damage in standard tests for durability per ASTM C666/C666M, “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing,” and ASTM C672/C672M, “Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces

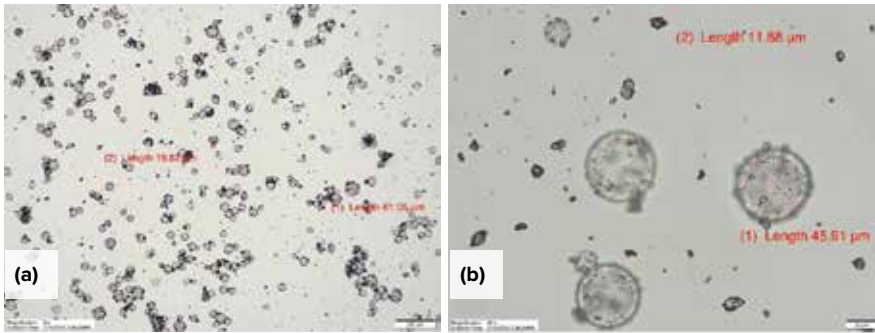


Fig. 1: Photomicrographs showing well-dispersed mineral-blended polymeric microspheres with an average particle size of 40 μm (0.0016 in.) and a density of 25 kg/m³ (1.56 lb/ft³): (a) at 5× magnification; and (b) at 40× magnification

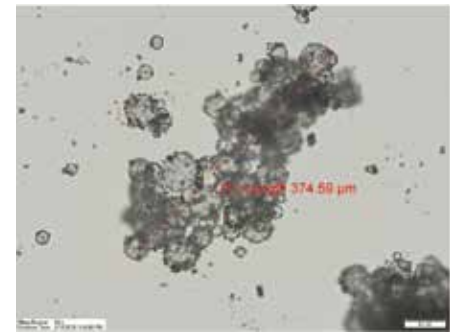


Fig. 2: Photomicrograph of agglomerations of polymeric microspheres at 20× magnification. Agglomerations occur when little or no mineral powder is present

Exposed to Deicing Chemicals.” The effectiveness of the microsphere-powder blend is also compared to the effectiveness of conventional air entrainment produced with commonly available AEAs.

Mineral-Blended Polymeric Microspheres

Blending dry-expanded polymeric microspheres with an adequate quantity of mineral powder enables the surfaces of the microspheres to be coated. The coating prevents the microspheres from sticking together and agglomerating to form larger particles prior to being added to a concrete mixture and facilitates uniform dispersion of the microspheres into a concrete mixture. Also, for ease of handling, the microsphere-powder blend can be dispensed into the concrete mixture in a sack that disintegrates and disappears during mixing, thus avoiding the problem of dusting. Application of the microsphere-powder blend in concrete to provide protection from damage due to cyclic F-T is covered by U.S. Patent No. 10,730,794 B1.⁷

Photomicrographs of the microsphere-powder blend from optical microscopy are shown in Fig. 1. The photomicrographs show that the spherical microspheres are quite well dispersed in the powder blend. When no or an insufficient quantity of the mineral powder is blended with the microspheres, the microsphere particles are severely agglomerated, as shown in the photomicrograph in Fig. 2. The size labels on the photomicrographs represent the sizes for selected microspheres and mineral powder particles. As explained from the analysis in Reference 6, the quantity of agglomerated microspheres, either in dry powder or slurry form, by volume of concrete needed to achieve a durable concrete would be higher compared to that of the nonagglomerated, well-dispersed microspheres. Figure 3 is a photomicrograph obtained in cross-polarized light showing well-dispersed spherical microspheres with mineral powder adhering to them. When the microsphere-powder blend is mixed in concrete, the mineral powder is dispersed because its electrostatic attraction to the microspheres is broken.

The patented microsphere-powder blend is formulated to reliably protect concrete from damage at a fixed volume

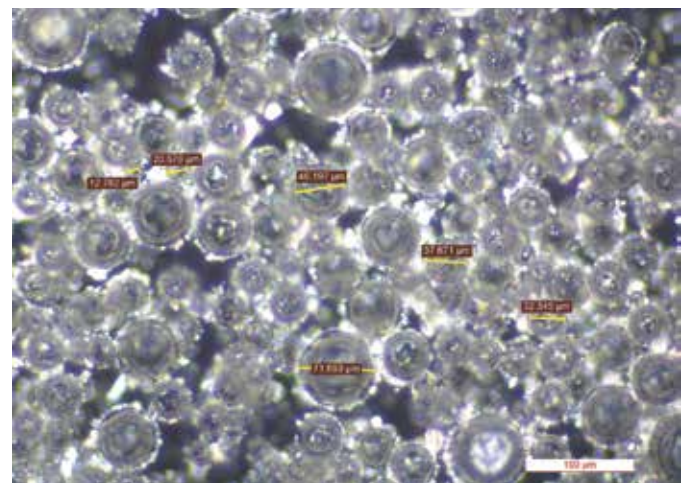


Fig. 3: Photomicrograph of mineral-blended polymeric microspheres in cross-polarized light at 200× magnification, showing adherence of the mineral powder particles on well-dispersed microspheres

fraction in typical concretes. The powder blend formulation represented by the photomicrographs in Fig. 1 and 3 has a consistent particle size distribution. The quantity of mineral powder used in the formulation ensures that agglomeration is sufficiently reduced while also ensuring a sufficient quantity of microspheres to deliver the intended performance without using an excessive dosage of the powder blend in the concrete.

Test Program

Three mixture categories were prepared (Table 1):

- Category A mixtures comprised basic constituents of aggregate, water, and cement;
- Category B mixtures comprised the same basic constituents as Category A, plus a commonly used AEA (surfactant); and
- Category C mixtures comprised the same basic constituents as Category A, plus mineral-blended microspheres.

Within each category, mixtures were prepared with a water-cement ratio (*w/c*) of either 0.52 or 0.42 (Table 1) using a rotary drum mixer. For all but one mixture in Category B, a

Table 1:
Concrete mixture proportions, slump, air content, and density

| Constituents and properties | Concrete mixtures | | | | | | |
|---|-------------------|------|------|------|------|-------|------|
| | A1 | B1 | C1 | C2 | A2 | B2 | C3 |
| Cement, kg/m ³ | 335 | | | | 400 | | |
| Coarse aggregate, kg/m ³ | 1104 | 1042 | 1104 | 1104 | 1068 | 1009 | 1068 |
| Fine aggregate, kg/m ³ | 739 | 695 | 707 | 699 | 736 | 692 | 704 |
| Water, kg/m ³ | 174 | | | | 168 | | |
| w/c | 0.52 | | | | 0.42 | | |
| AEA, mL/m ³ | — | 96.2 | — | — | — | 230.8 | — |
| Microsphere content, vol. % of concrete | — | — | 1.0 | 1.25 | — | — | 1.0 |
| HRWRA (Type F), mL/m ³ | 923 | — | 1235 | 1104 | 2762 | 962 | 2623 |
| Slump, mm | 155 | 140 | 140 | 140 | 115 | 135 | 110 |
| Air content, vol. % of concrete | 2.3 | 5.8 | 2.7 | 2.2 | 2.1 | 5.9 | 2.6 |
| Density, kg/m ³ | 2336 | 2248 | 2314 | 2307 | 2375 | 2277 | 2320 |

Note: 1 kg/m³ = 1.7 lb/yd³; 1 mL/m³ = 0.026 fl oz/yd³; 1 mm = 0.04 in.

Type F high-range water-reducing admixture (HRWRA) was used to achieve a 125 to 180 mm (5 to 7 in.) target slump.

Category B mixtures were prepared with a commercially available Vinsol[®] resin-based AEA at a dosage needed to achieve an air content of about 6%. Category C mixtures were prepared with a mineral-blended microsphere powder added with the cement. Category C mixture proportions were based on the proportions of Category A mixtures, with the fine aggregate volume reduced to compensate for the volume of the added powder blend.

The microsphere-powder blend used to prepare Category C mixtures had a specific gravity of 0.25. Two powder blend dosages were used: 1.2 and 1.5% by volume of the concrete. These dosages were designed to yield microsphere dosages of 1.0 and 1.25% by volume of the concrete, respectively. These values were selected because the minimum volume fraction of microspheres in concrete needed to achieve durability against cyclic F-T is about 1.0%.⁶

The microsphere-powder blend for Mixture C3 was dispensed into the concrete mixture in a sack that disintegrated and disappeared during mixing. This sack was made of patented white paper that disintegrates more easily than typical paper sacks that have a high lignin or “glue” content.⁸

Basic tests

For each batch of concrete, unit weight and air content were measured per ASTM C138/C138M, “Standard Test

Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete,” and ASTM C231/C231M, “Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method,” respectively (refer to Table 1 for results). Also, three 100 x 200 mm (4 x 8 in.) cylinders were cast for compressive strength testing at 28 days per ASTM C39/C39M, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.”

Durability tests

Also 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, and further, the mixtures with w/c of 0.42 were tested for salt scaling in accordance with ASTM C672/C672M, using two 300 x 300 x 100 mm (12 x 12 x 4 in.) specimens for each batch.

Evaluation of quality assurance test methods

In a separate study, concrete mixtures with microsphere volume fractions in the range of 0 to 2% were tested to determine if standard quality assurance test methods could be used to verify microsphere content in the field. The methods were:

- ASTM C173/C173M, “Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method,” modified only by omitting the addition of isopropyl alcohol⁹; and

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

| Test results | Concrete mixtures | | | | | | |
|--|-------------------|------|------|------|------------|------|------|
| | A1 | B1 | C1 | C2 | A2 | B2 | C3 |
| | w/c = 0.52 | | | | w/c = 0.42 | | |
| 28-day compressive strength, MPa | 37.3 | 33.9 | 36.6 | 35.4 | 51.4 | 41.8 | 45.7 |
| Durability factor, % (≥ 60% at 300 cycles) | Fail | 88 | 85 | 86 | Fail | 90 | 84 |
| Relative durability factor, % (≥ 80% at 300 cycles) | — | 100 | 97 | 98 | — | 100 | 93 |
| Scaling rating at 50 cycles | — | — | — | — | 5 | 1 | 1 |
| Scaling mass loss at 50 cycles, g/m ² (≤ 800 g/m ² after 50 cycles) | — | — | — | — | 901 | 123 | 65 |

Note: 1 kg/m³ = 1.7 lb/yd³; 1 mL/m³ = 0.026 fl oz/yd³; 1 mm = 0.04 in.; 1 MPa = 145 psi; 1 g/m² = 0.003 oz/ft²

- The Super Air Meter (SAM) testing device,¹⁰ applied in accordance with AASHTO TP 118, “Standard Method of Testing for Characterizing of the Air-Void System of Freshly Mixed Concrete by the Sequential Pressure Method.”

The volumetric air content tests were performed under the assumption that the microspheres in a test sample would segregate from the concrete and conglomerate at the top of the graduated cylinder. The tests were conducted without the standard isopropyl alcohol because this chemical is a solvent that could cause the microspheres to collapse. The SAM investigation was performed under the assumption that the pressures used in the testing could compress the microspheres in the concrete mixture and enable the test to be sensitive to the microsphere content of the concrete.

Test Results and Discussion

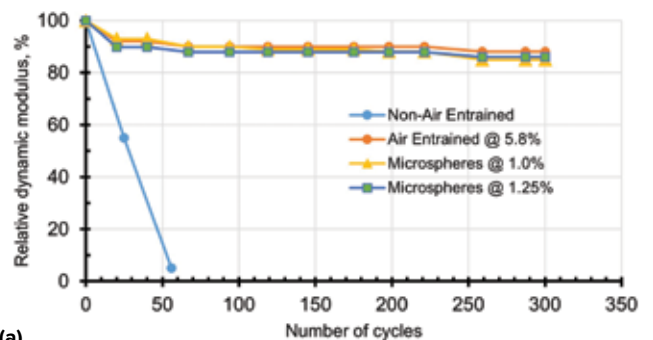
The test data in Table 2 show that the compressive strength of Mixtures C1 and C3 with a microsphere content of 1.0% by volume of the concrete was about 10% higher than the strength of Mixtures B1 and B2 with about 6% air content. Therefore, from the standpoint of sustainability and cost benefits, concrete mixtures with the mineral-blended polymeric microspheres can have somewhat lower amounts of cementitious materials and yet match the strengths of mixtures with conventional AEAs.

Cyclic F-T

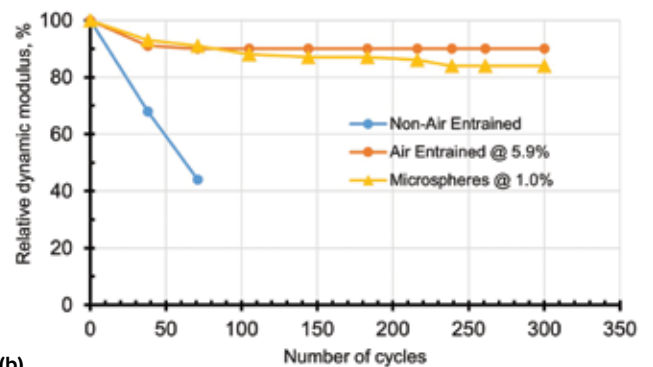
Per ASTM C666/MC666, Procedure A, for a concrete mixture to be considered able to withstand an F-T environment, it must achieve a durability factor of 60% or greater. Also, the durability factor of the concrete relative to that of an air-entrained concrete (that is, the relative durability factor) must be 80% or greater. The results show that concretes containing the microsphere-powder blend passed the cyclic F-T test at microsphere contents of 1.0 and 1.25%, with durability factor values within a narrow range of 84 to

86% (refer to Mixtures C in Table 2). Also, relative durability factor values in the range of 93 to 98% show that these concretes were comparable to the air-entrained concretes (Mixtures B). As expected, the non-air-entrained concretes (Mixtures A) failed the cyclic F-T test.

Figure 4 shows that the concretes containing the microsphere-powder blend and the air-entrained concretes passed the cyclic F-T test at relative dynamic modulus values



(a)



(b)

Fig. 4: Relative dynamic modulus versus number of cycles of F-T: (a) for Mixtures A1, B1, C1, and C2 with w/c = 0.52; and (b) for Mixtures A2, B2, and C3 with w/c = 0.42

that were quite stable from about 35 cycles to the end of the test, at 300 cycles of F-T. Microsphere contents of 1.0 and 1.25% yielded the same performance, as shown in Fig. 4(a), indicating that using more than the minimum microsphere content needed to achieve a durable concrete is not warranted. Figure 5 shows that for the concrete mixtures with a w/c of 0.42, the surface-scaling levels of Mixtures C (with microspheres) and Mixtures B (air-entrained) were comparable after the 300 cycles of rapid F-T in water.

Surface scaling

The visual surface-scaling ratings of the specimens evaluated for salt-scaling resistance (ASTM C672/C672M) as reported in Table 2 show that Mixture C3, containing the microsphere-powder blend, performed similarly to the air-entrained concrete (Mixture B2) with an average scaling rating of 1 (very slight scaling), compared to the scaling rating of 5 (severe scaling) for the non-air-entrained concrete (Mixture A2). The mass loss values were 65 g/m^2 (0.20 oz/ft^2) for Mixture C3 with microspheres, 123 g/m^2 (0.37 oz/ft^2) for

Mixture B2 with air entrainment, and 901 g/m^2 (2.70 oz/ft^2) for Mixture A2 with no air entrainment. These values indicate acceptable performance for the microsphere concrete and the air-entrained concrete as per Canadian specifications that impose a limit of 800 g/m^2 (2.40 oz/ft^2) for mass loss after 50 cycles of F-T.¹¹

Figure 6 shows the surface appearance of a test specimen containing microspheres compared to that of the non-air-entrained and air-entrained specimens after 50 cycles of testing. Superior performance is observed for the microsphere concrete and the air-entrained concrete compared to the severe scaling of the non-air-entrained concrete.

Microsphere dosing and quality assurance

As previously noted, the microsphere-powder blend was added to Mixture C3 in a sack designed to completely disintegrate and disappear during mixing. To dose a 0.76 m^3 (1 yd^3) batch of concrete, for example, one 20 L (0.71 ft^3) sack is required to be added to the mixture. Other sack sizes can be used as deemed appropriate. This method of dispensing the powder blend into a concrete mixture facilitates handling and eliminates any issue regarding dusting of the material. This method also facilitates adding the right quantity of the microsphere-powder blend by simply counting the number of sacks added instead of weighing the powder for every batch of concrete produced. In addition, tests of batches containing a range of dosages show that the modified ASTM C173/C173M test method can be used to verify the microsphere content of the concrete prior to concrete placement (Fig. 7). A layer of microspheres collects in the graduated neck of the volumetric meter beneath a small layer of foam. The thickness of the microsphere layer, in volume percent of the concrete, gives a measure of the microsphere content of the concrete. The preliminary evaluations conducted for this study showed that for a microsphere content of 1.0% by volume of concrete, the measured values were in the range of $1.0 \pm 0.1\%$.

Tests conducted using the SAM testing device showed that non-air-entrained concrete mixtures with microspheres had similar SAM numbers as mixtures without microspheres. This

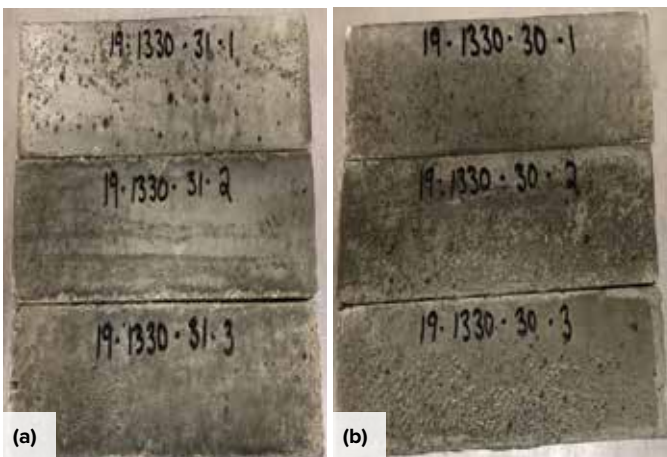


Fig. 5: Concrete specimens prepared with $w/c = 0.42$ shown after 300 cycles of rapid F-T per ASTM C666/C666M, Procedure A: (a) air-entrained concrete; and (b) microsphere concrete



Fig. 6: Surfaces of concrete specimens prepared with $w/c = 0.42$ after 50 cycles of salt-scaling testing per ASTM C672/C672M: (a) non-air-entrained concrete; (b) air-entrained concrete; and (c) microsphere concrete

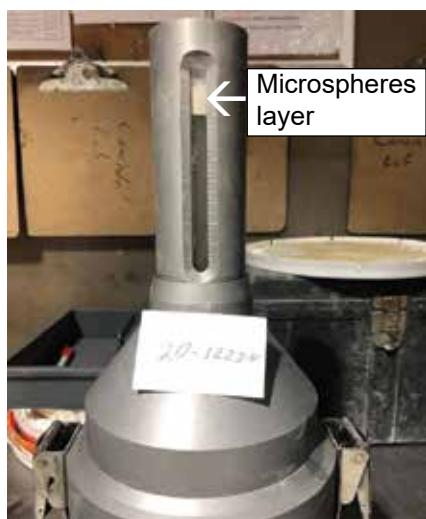


Fig. 7: The microsphere content of a concrete mixture can be evaluated using a volumetric meter

implies that the pressures used in the test are not high enough to compress the microspheres and yield readings that would vary with the microsphere content of the concrete. As such, the SAM testing would not be a suitable means of quality control for concrete containing microspheres. Carefully counting the number of sacks of the microsphere-powder blend added into a concrete batch, along with performing the ASTM C173/C173M test without using isopropyl alcohol, would verify that the microspheres are present in the right quantity prior to concrete placement.

Potential Benefits

Environmental benefits

The microsphere-powder blend, while eliminating the practical problems encountered in air entrainment, would also enable the large-scale use of fly ash with high unburned carbon content as a supplementary cementitious material.⁹ Such low-grade fly ash is usually landfilled as it is considered unusable without further treatment because it makes air entrainment of concrete difficult or impossible. Also, use of the microsphere-powder blend to replace an equal volume of sand while achieving an F-T durable concrete would contribute to conservation of concrete sand as a natural resource.

Constructability benefits

Hard troweling of air-entrained concrete floors or slabs carries the risks of reduction in surface air content and delamination or blistering. Use of the microsphere-powder blend in place of air entrainment should allow for dense, polished, machine-troweled surfaces to be specified for concrete slabs in environments that could be at risk of exposure to cyclic F-T. Also, roller-compacted concrete and pervious concrete that are difficult to air entrain because of their stiff consistency^{12,13} can be made durable against cyclic F-T with the addition of the microsphere-powder blend.

Recently, it has been shown that air bubbles dissolve in the fresh concrete when concrete is pumped but are reformed

prior to hardening of the concrete.¹⁴ As such, the air content of the hardened concrete would tend to be higher than the air content of the fresh concrete measured after pumping. This observation may also apply to wet-mix shotcrete, which is used in a variety of structural and repair applications.¹⁵ Because the microsphere-powder blend will offer a more reliable and robust protection of pumped concrete from damage caused by F-T, it would eliminate the production and placement issues related to pumping of air-entrained concrete.

Concluding Remarks

The work reported here and in Reference 6 shows that precoating dry-expanded polymeric microspheres by blending with a mineral powder can minimize agglomeration of the microspheres and promote their uniform dispersion and distribution in a concrete mixture. The use of a disintegrating sack to dispense the material into a concrete mixture facilitates adding the right quantity of the microsphere-powder into a concrete batch simply by counting the number of sacks added instead of weighing the powder for every batch of concrete produced.

Cyclic F-T and deicing salt-scaling testing show that the microsphere-powder blend at a microsphere content of 1.0% by volume of the concrete is as effective as air entrainment in protecting concrete from F-T damage, but it is not saddled with the uncertainties associated with air entrainment. Performing the modified ASTM C173/C173M test without isopropyl alcohol would verify that the microspheres are present in the right quantity prior to concrete placement.

Also, as shown in Reference 6, the minimum quantity of microspheres by volume of concrete needed to protect the concrete from cyclic F-T is determined based on the required maximum spacing of the particles. As such, the spacing requirement is expected to be met when the minimum quantity of microspheres calculated from the equations in Reference 6 is used in the concrete. Therefore, microscopical analysis of the microsphere content and distribution in the hardened concrete based on ASTM C457/C457M, “Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete,” would need to be developed. An appropriate range of magnification to use in the microscopical examination of the microsphere concrete would need to be established because the microspheres are much smaller than the typical size of entrained air voids. Preliminary evaluations of concretes containing microspheres using the current ASTM C457/C457M test method at higher magnifications than typically used, such as 200×, indicate that an acceptable level of accuracy would be achieved in quantifying the amounts of microspheres in the hardened concretes.

Acknowledgments

The support of SGS TEC Services, Lawrenceville, GA, USA, particularly that of laboratory General Manager Shawn McCormick, in performing the concrete tests is gratefully acknowledged.

References

1. de Rook, P., "Process for Preparing Frost Resistant Concrete," U.S. Patent No. 4,057,526, Nov. 1977.
2. Ozyildirim, C.H., and Sprinkel, M.M., "Investigation of Concrete Mixtures Incorporating Hollow Plastic Microspheres," *Report VHTRC 82-R7*, Virginia Highway and Transportation Research Council, Charlottesville, VA, 1981, 38 pp.
3. Bury, M.A.; Ong, F.; Attiogbe, E.; Nmai, C.; and Smith, J., "Microsphere-Based Admixture for Durable Concrete," *Concrete International*, V. 36, No. 3, Mar. 2014, pp. 59-63.
4. Ong, F.S.; Attiogbe, E.K.; Nmai, C.K.; and Smith, J.C., "Freezing and Thawing Behavior of Cementitious Systems with New Polymeric Microsphere-Based Admixture," *ACI Materials Journal*, V. 112, No. 6, Nov.-Dec. 2015, pp. 735-743.
5. Moffat, E.G., and Thomas, M.D.A., "Polymeric Microspheres Provide Resistance to Harsh Winter Conditions," *Concrete International*, V. 41, No. 1, Jan. 2019, pp. 36-41.
6. Attiogbe, E.K., "Compliance Concept in Protection of Concrete from Freezing-and-Thawing Damage," *ACI Materials Journal*, V. 117, No. 6, Nov.-Dec. 2020, doi: 10.14359/51726995.
7. Attiogbe, E.K., "Method of Delivery of Dry Polymeric Microsphere Powders for Protecting Concrete from Freeze-Thaw Damage," U.S. Patent No. 10,730,794 B1, Aug. 2020.
8. "Frequently Asked Questions," BillerudKorsnäs AB, Solna, Sweden. www.billerudkorsnas.com/our-offer/packaging-solutions/sack-solutions/d-sack/d-sack-faq. Accessed Nov. 23, 2020.
9. Ong, F.S.; Nmai, C.K.; Smith, J.C.; and Luciano, J., "Microspheres-Based Admixture for Freeze-Thaw Durability of Concrete," *Thirteenth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues*, SP-303, T.C. Holland, P.R. Gupta, and V.M. Malhotra, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, pp. 255-268.
10. 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.
11. "Material Specification for Aggregates—Concrete," OPSS.PROV 1002, Ministry of Transportation, Toronto, ON, Canada, 2012, 15 pp.
12. Service d'Expertise en Matériaux Inc., "Frost Durability of Roller-Compacted Concrete Pavements," RD135, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2004, 140 pp.
13. Kevern, J.T.; Wang, K.; and Schafer, V.R., "Test Methods for Characterizing Air Void Systems in Portland Cement Pervious Concrete," *Recent Advancement in Concrete Freezing-Thawing (F-T) Durability*, K. Wang, ed., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, pp. 119-134.
14. Becker, J., and Ley, T., "Concrete Pumping Effects on Air-Entrained Voids in Concrete Mixture," *Report No. SPTC14.1-38-F*, Southern Plains Transportation Center, Norman, OK, 2019, 41 pp.
15. Talukdar, S., and Heere, R., "The Effects of Pumping on the Air Content and Void Structure of Air-Entrained, Wet Mix Fibre Reinforced Shotcrete," *Case Studies in Construction Materials*, V. 11, Dec. 2019, 6 pp.

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

Selected for reader interest by the editors.



Emmanuel K. Attiogbe, FACI, is a Research Engineer in private practice in Discovery Bay, CA, USA. Prior to that, he was Head of Innovation for 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 Strategic Development Council, and a past member of the ACI Board of Direction. He is a member of several ACI committees and the Concrete Research Council of the ACI Foundation. He was awarded the 1995 ACI Wason Medal for Materials Research and the 2015 ACI Henry L. Kennedy Award. 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.

Sign up for
Concrete
SmartBrief

*The smart way to stay
on top of concrete
industry news.*

Created by SmartBrief in partnership with ACI, Concrete SmartBrief provides a daily e-mail snapshot of the concrete industry with news from leading global sources. Summaries of what matters to you, written by expert editors, to save you time and keep you informed and prepared.

Welcome to Concrete SmartBrief; sign up at:

www.smartbrief.com/ACI

Una nueva forma de protección contra los daños por hielo-deshielo

Mezclado de microesferas con polvo mineral para minimizar la aglomeración y asegurar la durabilidad

Por Emmanuel K. Attiogbe

Durante mucho tiempo se ha conocido la inclusión de aire como un medio eficaz para proteger el concreto de los daños por ciclos de hielo-deshielo (H-D); los vacíos de aire en la matriz proporcionan espacios para que crezcan los cristales de hielo y, por lo tanto, mitigan los esfuerzos de tensión interna que pueden causar el agrietamiento del concreto. Las burbujas de aire son arrastradas en el concreto fresco por la acción mecánica de mezclar los ingredientes, y se estabilizan utilizando un surfactante, conocido en la industria como un agente inclusor de aire (AIA). Sin embargo, la cantidad de aire estable que se arrastra sólo puede controlarse indirectamente mediante el ajuste de la cantidad o el tipo de AIA que se añade al concreto. Asimismo, los investigadores han descubierto que los AIA pueden ser poco eficaces si no favorecen la formación de un espaciado constante de los vacíos de aire en el concreto. Muchos productores enfrentan dificultades para lograr un espaciado entre vacíos constante, porque la eficacia de los surfactantes se ve afectada por el medio ambiente y los ingredientes de la mezcla. Por lo tanto, es conveniente contar con una alternativa a la inclusión de aire que permita incorporar estructuras vacías al concreto sin necesidad de estabilizar las burbujas de aire durante la mezcla. Esto ha dado lugar al desarrollo de tecnologías como las que comprenden las microesferas poliméricas de núcleo hueco.¹⁻⁵

Un estudio reciente ofrece una explicación basada en la micromecánica de cómo tales microesferas protegen al concreto de los daños causados por el H-D.⁶ Las microesferas de núcleo hueco disponibles en el mercado tienen paredes poliméricas y espacios interiores rellenos de un líquido o un gas. La cubierta

de polímero y los materiales de relleno exhiben altas tasas de expansión y contracción térmica, lo que permite que las microesferas se contraigan en relación con el concreto durante las disminuciones de temperatura. Esta contracción diferencial crea un vacío esférico entre la microesfera y la superficie del concreto que se formó en la microesfera al fraguar el concreto. Un tipo de microesfera conocida por proteger al concreto de los daños causados por el ciclo de H-D es la marca registrada Expancel®. Este producto está disponible en dos formas:

- Microesferas llenas de gas, expandidas por humedad, en forma de espuma húmeda o lechada; o
- Microesferas llenas de gas, expandidas en seco como polvo seco.

En ambas formas, las microesferas tienen densidades bajas, y tienden a adherirse entre sí y formar aglomeraciones. Esta aglomeración de partículas es perjudicial para el desempeño porque las microesferas deben estar uniformemente dispersas por todo el concreto para protegerlo de los daños durante el ciclo de H-D. Además, las microesferas suministradas como polvo seco son difíciles de manejar, ya que el polvo seco causa polvillo. Si bien esta última cuestión implica que las microesferas expandidas en húmedo en forma de lechada se preferirían para su uso en el concreto, la lechada crea desafíos en la producción de concreto porque las microesferas de muy baja densidad se segregan del medio líquido durante el almacenamiento. Para superar esta inestabilidad inherente, la mejor manera es producir la lechada en el momento de su incorporación al concreto.³ Esto genera altos costos de producción y logística que han frenado la introducción de

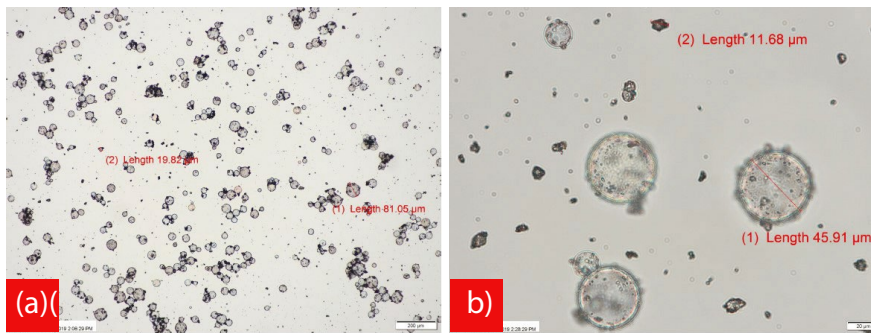


Fig. 1: Microfotografías que muestran microesferas poliméricas mezcladas con minerales bien dispersos con un tamaño promedio de partículas de 40 μm (0,0016 pulgadas) y una densidad de 25 kg/m³ (1,56 libras/pie³): (a) con un aumento de 5x; y (b) con un aumento de 40x.

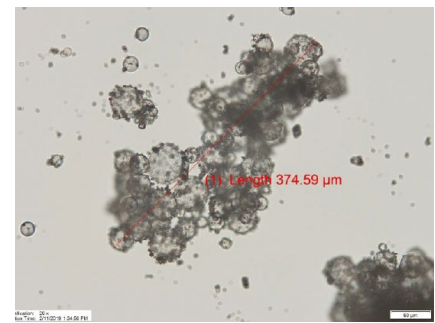


Fig. 2: Fotomicrografía de aglomeraciones de microesferas poliméricas con un aumento de 20x. Las aglomeraciones se producen cuando hay poco o ningún polvo mineral presente.

la tecnología de la microesfera en la práctica general.

Este artículo presenta datos de ensayos que muestran la efectividad de un nuevo método de suministro de microesferas en el concreto. El nuevo método se basa en una mezcla de microesferas y polvo que elimina o minimiza la aglomeración de partículas y facilita el manejo y la entrega de las microesferas en las mezclas de concreto. Los datos de ensayo se proporcionan para mostrar la eficacia de las microesferas entregadas en la protección del concreto contra los daños en los ensayos estándar de durabilidad según ASTM C666/C666M, “Método de ensayo estándar para la resistencia del concreto al hielo y deshielo rápido” y ASTM C672/C672M, “Método de prueba estándar para la resistencia a la descamación de superficies de concreto expuestas a químicos para el deshielo”. La eficacia de la mezcla de polvo con microesferas también se compara con la eficacia en la inclusión de aire convencional, que se produce con los AIA comunes.

Microesferas poliméricas mezcladas con minerales

La mezcla de microesferas poliméricas expandidas en seco con una cantidad adecuada de polvo mineral permite cubrir las superficies de las microesferas. Este recubrimiento impide que las microesferas se peguen entre sí y se aglomeren para formar partículas más grandes, antes de ser añadidas a una mezcla de concreto y facilita la dispersión uniforme de las microesferas en una mezcla de concreto. Además, para facilitar la manipulación, la mezcla de polvo con microesferas se puede dosificar en la mezcla de concreto en un saco que se desintegra y que desa-

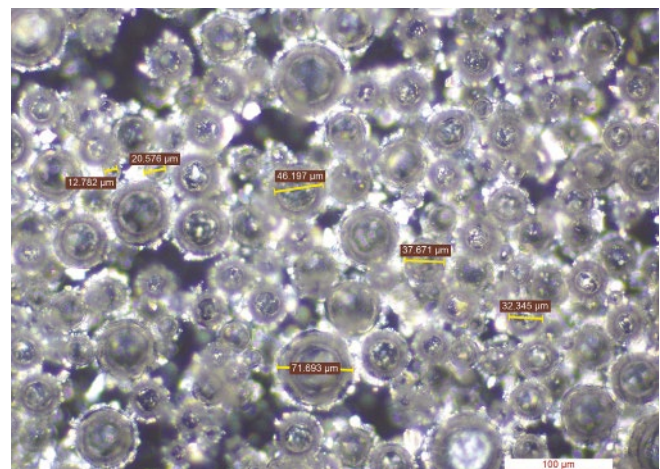


Fig. 3: Microfotografía de microesferas poliméricas mezcladas con minerales en luz de polarización cruzada con un aumento de 200x, que muestra la adherencia de las partículas de polvo mineral en microesferas bien dispersas.

parezca durante la mezcla, evitando así el problema del polvillo. La aplicación de la mezcla de polvo con microesferas en el concreto para proveer protección contra el daño debido a los ciclos de H-D está cubierta por la patente estadounidense No. 10,730,794 B1.⁷

La Fig. 1 muestra las fotomicrografías por microscopía óptica de la mezcla de polvo con microesferas. Las microfotografías muestran que las microesferas esféricas están bastante bien dispersas en la mezcla de polvo. Cuando no se mezcla el polvo mineral con las microesferas o se mezcla en cantidades insuficientes, las partículas de las microesferas se aglomeran seriamente, como se muestra en la microfotografía de la Fig. 2. Las identificaciones de tamaño en las microfotografías representan los tamaños de las microesferas seleccionadas y las partículas de polvo mineral.

Como se explica a partir del análisis de la Referencia 6, la cantidad de microesferas aglomeradas, ya sea en forma de polvo seco o de lechada, por volumen de concreto necesario para lograr un concreto durable sería mayor en comparación con la de las microesferas no aglomeradas y bien dispersas. La figura 3 es una microfotografía obtenida con luz de polarización cruzada que muestra a las microesferas esféricas bien dispersas con polvo mineral adherido a ellas. Cuando la mezcla de polvo con microesferas se mezcla en el concreto, el polvo mineral se dispersa porque su atracción electrostática a las microesferas se rompe.

La mezcla patentada de polvo microesférico está formulada con la finalidad de proteger de manera confiable al concreto de los daños en una fracción de volumen fijo en los concretos comunes. La formulación de la mezcla de polvo representada por las microfotografías en las Fig. 1 y 3 tiene una distribución de tamaño de partícula consistente. La cantidad de polvo mineral utilizada en la formulación asegura que la aglomeración se reduzca lo suficiente, asegurando al mismo tiempo una cantidad suficiente de microesferas para obtener el comportamiento deseado, sin utilizar una dosis excesiva de la mezcla de polvo en el concreto.

Programa de pruebas

Se prepararon tres categorías de mezclas (Tabla 1):

- Las mezclas de la categoría A incluían los compuestos básicos de los agregados, el agua y el cemento;
- Las mezclas de la categoría B incluían los mismos compuestos básicos que los de la categoría A, más un AIA (surfactante) de uso común; y
- Las mezclas de la categoría C incluían los mismos compuestos básicos de la categoría A, además de microesferas con mezcla de minerales.

Dentro de cada categoría, las mezclas se prepararon con una relación agua-cemento (a/c) de 0,52 o 0,42 (Tabla 1), utilizando una mezcladora de tambor giratorio. Para todas las mezclas de la Categoría B, excepto una, se utilizó un aditivo reductor de agua de alto rango (HRWRA) Tipo F, para lograr un revenimiento objetivo de 125 a 180 mm (5 a 7 pulg.).

Las mezclas de la categoría B se prepararon con una AIA a base de resina Vinsol® disponible en el mercado, en la dosis necesaria para lograr un contenido de aire de alrededor del 6%. Las mezclas de la categoría C se prepararon con una mezcla de polvo mineral con microesferas añadido con el cemento. Las proporciones de las mezclas de la categoría C se basaban en los proporcionamientos de las mezclas de la categoría A,

Tabla 1:

Proporcionamiento de las mezclas de concreto, revenimiento, contenido de aire y densidad

| Ingredientes y propiedades | Identificación de las mezclas de concreto | | | | | | |
|--|---|------|------|------|------|-------|------|
| | A1 | B1 | C1 | C2 | A2 | B2 | C3 |
| Cemento, kg/m ³ | 335 | | | | 400 | | |
| Agregado grueso, kg/m ³ | 1104 | 1042 | 1104 | 1104 | 1068 | 1009 | 1068 |
| Agregado fino, kg/m ³ | 739 | 695 | 707 | 699 | 736 | 692 | 704 |
| Agua, kg/m ³ | 174 | | | | 168 | | |
| a/c | 0.52 | | | | 0.42 | | |
| AIA, mL/m ³ | — | 96.2 | — | — | — | 230.8 | — |
| Contenido de microesferas, % en vol. de concreto | — | — | 1.0 | 1.25 | — | — | 1.0 |
| HRWRA (Tipo F), mL/m ³ | 923 | — | 1235 | 1104 | 2762 | 962 | 2623 |
| Revenimiento, mm | 155 | 140 | 140 | 140 | 115 | 135 | 110 |
| Contenido de aire, % en vol. de concreto | 2.3 | 5.8 | 2.7 | 2.2 | 2.1 | 5.9 | 2.6 |
| Densidad, mL/m ³ | 2336 | 2248 | 2314 | 2307 | 2375 | 2277 | 2320 |

Nota: 1 kg/m³ = 1,7 lb/yd³; 1 mL/m³ = 0,026 oz fl/yd³; 1 mm = 0,04 pulg.

reduciéndose el volumen de los agregados finos para compensar el volumen añadido de la mezcla de polvos.

La mezcla de polvo con microesferas utilizada para preparar las mezclas de la categoría C, tenía un peso específico de 0,25. Se utilizaron dos dosis de mezcla de polvos: 1,2 y 1,5% por volumen del concreto. Estas dosis fueron diseñadas para producir dosis de microesferas de 1,0 y 1,25% por volumen del concreto, respectivamente. Estos valores fueron seleccionados debido a que la fracción mínima del volumen de microesferas en el concreto, necesaria para lograr la durabilidad contra los ciclos de H-D es de alrededor del 1,0%⁶.

Para la Mezcla C3, la mezcla de polvo con microesferas se dosificó en la mezcla de concreto en un saco que se desintegró y desapareció durante el mezclado. Este saco estaba hecho de papel blanco patentado que se desintegra más fácilmente que los típicos sacos de papel que tienen un alto contenido de lignina o “pegamento”⁸.

Pruebas básicas

Para cada lote de concreto, se midió el peso unitario y el contenido de aire según la norma ASTM C138/C138M, “Método de prueba estándar para la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del concreto” y ASTM C231/C231M, “Método de prueba estándar para el contenido de aire del

concreto recién mezclado por el método de la presión”, respectivamente (refiérase a la Tabla 1 para los resultados). Además, se colaron tres cilindros de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg.) para la prueba de resistencia a la compresión a 28 días, según ASTM C39/C39M, “Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto”.

Pruebas de durabilidad

Además, para cada lote de concreto, se colaron tres especímenes de 75 x 100 x 405 mm (3 x 4 x 16 pulg.) para ser ensayados de acuerdo con la norma ASTM C666/C666M, Procedimiento A, y además, las mezclas con a/c de 0,42 fueron ensayadas para determinar el deconchamiento por sales, de acuerdo con la norma ASTM C672/C672M, usando dos especímenes de 300 x 300 x 100 mm (12 x 12 x 4 pulg.) para cada lote.

Evaluación de los métodos de prueba para el aseguramiento de la calidad

En un estudio aparte, se ensayaron mezclas de concreto con fracciones del volumen de microesferas en el rango de 0 a 2% para determinar si se podían utilizar métodos de prueba estándar para asegurar la calidad con la intención de verificar el contenido de microesferas en el campo. Los métodos fueron:

- ASTM C173/C173M, “Método de prueba estándar para determinar el contenido de aire de concreto

Tabla 2: Resistencia y comportamiento del concreto, bajo ciclos repetidos de H-D

| Compuestos y propiedades | Mezclas de concreto y categorías | | | | | | |
|---|----------------------------------|------|------|------|------------|------|------|
| | A1 | B1 | C1 | C2 | A2 | B2 | C3 |
| | w/c = 0.52 | | | | w/c = 0.42 | | |
| Resistencia a la compresión a los 28 días, MPa | 37.3 | 33.9 | 36.6 | 35.4 | 51.4 | 41.8 | 45.7 |
| Factor de durabilidad, % (≥ 60% a 300 ciclos) | Fail | 88 | 85 | 86 | Fail | 90 | 84 |
| Factor de durabilidad relativa, % (≥ 80% a 300 ciclos) | — | 100 | 97 | 98 | — | 100 | 93 |
| Rango de escala a 50 ciclos | — | — | — | — | 5 | 1 | 1 |
| Escala de pérdida de masa a 50 ciclos, g/m ² (≤ 800 g/m ² después de 50 ciclos), mL/m ³ | — | — | — | — | 901 | 123 | 65 |

Nota: 1 kg/m³ = 1,7 lb/yard³; 1 mL/m³ = 0,026 oz fl/yard³; 1 mm = 0,04 pulg.; 1 MPa = 145 psi; 1 g/m² = 0,003 oz/pies².

recién mezclado por el método volumétrico”, modificado sólo por omitir la adición de alcohol isopropílico⁹; y El dispositivo de prueba Super Medidor de Aire (SAM)¹⁰, utilizado de acuerdo con la AASHTO TP 118, “Método de prueba estándar para la caracterización del sistema de vacío de aire del concreto recién mezclado por el método de presión secuencial”.

Las pruebas de contenido volumétrico de aire se realizaron bajo el supuesto de que las microesferas de una muestra de prueba se segregarían del concreto y se conglomerarían en la parte superior del cilindro graduado. Las pruebas se realizaron prescindiendo del alcohol isopropílico estándar, ya que esta sustancia química es un solvente que podría provocar que las microesferas se colapsen. La investigación mediante el SAM se llevó a cabo bajo el supuesto de que las presiones utilizadas en el ensayo podrían comprimir las microesferas de la mezcla de concreto y permitir que la prueba fuera sensible al contenido de microesferas del concreto.

Resultados de la prueba y discusión

Los resultados de las pruebas que aparecen en la Tabla 2 muestran que la resistencia a la compresión de las Mezclas C1 y C3 con un contenido de microesferas del 1,0% en volumen del concreto fue un 10% más alta que la resistencia de las Mezclas B1 y B2 con alrededor de un 6% de contenido de aire. Por consiguiente, desde el punto de vista de la sostenibilidad y la rentabilidad, las mezclas de concreto con las microesferas poliméricas mezcladas con minerales pueden tener cantidades algo menores de materiales cementantes y, sin embargo, igualar las resistencias de las mezclas con los AIA convencionales.

Ciclos de H-D

Según la norma ASTM C666/MC666, Procedimiento A, para que una mezcla de concreto pueda considerarse apta para soportar un ambiente de H-D, debe alcanzar un factor de durabilidad del 60% o superior. Además, el factor de durabilidad del concreto con respecto al de un concreto con aire incluido (es decir, el factor de durabilidad relativa) debe ser del 80% o mayor. Los resultados muestran que los concretos que contienen la

mezcla de polvos con microesferas pasaron la prueba del ciclo de H-D con contenidos de microesferas de 1,0 y 1,25%, con valores de factor de durabilidad dentro de un estrecho rango de 84 a 86% (ver Mezclas C en la Tabla 2). Además, los valores del factor de durabilidad relativa en un rango de 93 a 98% muestran que estos concretos eran comparables a los concretos con aire incluido (Mezclas B). Según lo previsto, los concretos sin aire incluido (Mezclas A) no pasaron la prueba del ciclo de H-D.

La Figura 4 muestra que los concretos que contienen la mezcla de polvo con microesferas y los concretos con aire incluido, pasaron la prueba del ciclo de H-D a valores de módulo dinámico relativo que fueron bastante estables, desde alrededor de los 35 ciclos hasta el final de la prueba, a 300 ciclos de H-D.

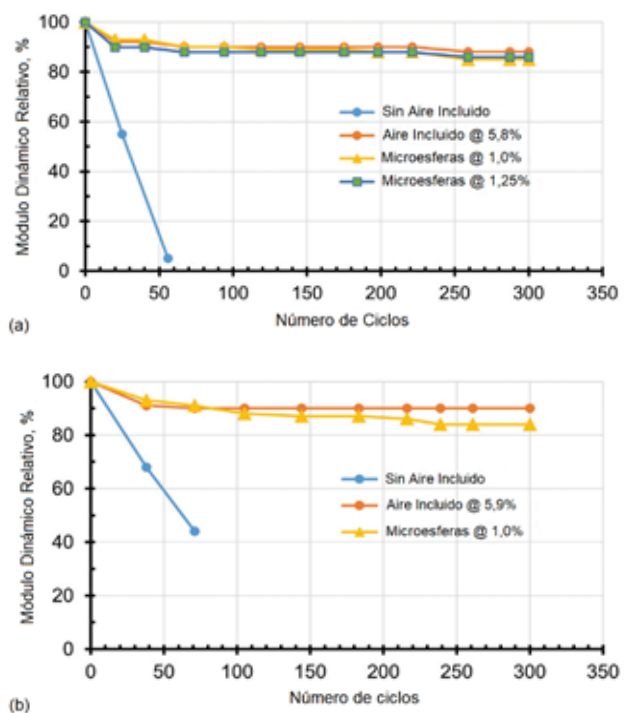


Fig. 4: Módulo dinámico relativo frente al número de ciclos de H-D: a) para las Mezclas A1, B1, C1 y C2 con una relación a/c = 0,52; y b) para las Mezclas A2, B2 y C3 con una relación a/c = 0,42

Los contenidos de microesferas de 1,0 y 1,25% obtuvieron el mismo comportamiento, como se muestra en la Fig. 4 (a), lo que indica que utilizar más del contenido mínimo de microesferas necesario para lograr un concreto durable no está justificado. La Figura 5 muestra que para las mezclas de concreto con una relación a/c

de 0,42, los niveles de desconchamiento superficial de las Mezclas C (con microesferas) y las Mezclas B (con aire incluido) fueron comparables después de los 300 ciclos de H-D rápido en agua.

Desconchamiento superficial

Las clasificaciones visuales del desconchamiento superficial en los especímenes evaluados en cuanto a la resistencia a la descamación salina (ASTM C672/C672M), como se indica en la Tabla 2, muestran que la Mezcla C3, que contiene la mezcla de polvo con microesferas, tuvo un comportamiento similar al del concreto con aire incluido (Mezcla B2) con una clasificación por desconchamiento media de 1 (desconchamiento muy leve), en comparación con la clasificación de desconchamiento de 5 (desconchamiento

severo) para el concreto sin aire incluido (Mezcla A2). Los valores de pérdida de masa fueron de 65 g/m² (0,20 oz/pie²) para la Mezcla C3 con microesferas, 123 g/m² (0,37 oz/pie²) para la Fig. 5: Especímenes de concreto preparados con una relación a/c = 0,42 mostrados después de 300 ciclos de H-D rápido según ASTM C666/C666M, Procedimiento A: a) concreto con aire incluido; y b) concreto con microesferas.

Mezcla B2 con aire incluido, y 901 g/m² (2,70 oz/pie²) para la Mezcla A2 sin aire incluido. Estos valores indican un rendimiento aceptable para el concreto con microesferas y el concreto con aire incluido, según las especificaciones canadienses que imponen un límite de 800 g/m² (2,40 onzas/pie²) para la pérdida de masa después de 50 ciclos de H-D.11

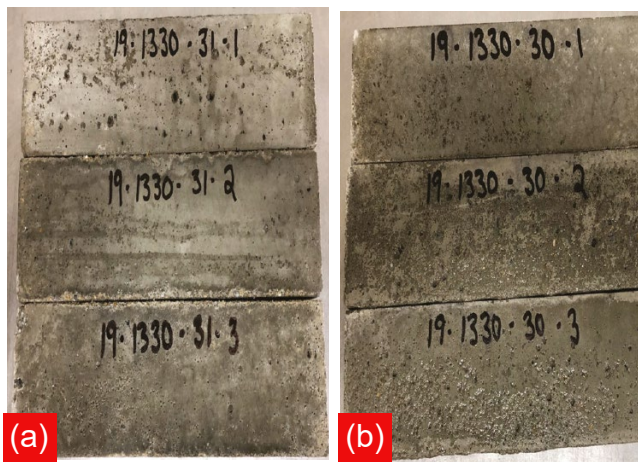


Fig. 5: Especímenes de concreto preparados con una relación a/c = 0,42 mostrados después de 300 ciclos de H-D rápido según ASTM C666/C666M, Procedimiento A: (a) concreto con aire incluido; y (b) concreto con microesferas

La figura 6 muestra el aspecto de la superficie de un espécimen de prueba que contiene microesferas, comparado con el de los especímenes sin aire incluido y con aire incluido, después de 50 ciclos de prueba. Se observa un comportamiento superior para el concreto con microesferas y el concreto con aire incluido, en comparación con el desconchamiento severo del concreto sin aire incluido.

Dosificación de microesferas y aseguramiento de la calidad

Como se ha señalado anteriormente, la mezcla de polvos de microesferas se añadió a la Mezcla C3 en un saco diseñado para desintegrarse completamente y desaparecer durante la mezcla. Para dosificar un



Fig. 6: Superficies de especímenes de concreto preparados con una relación a/c = 0,42 después de 50 ciclos de pruebas de descamación salina según ASTM C672/C672M: (a) concreto sin aire incluido; (b) concreto con aire incluido; y (c) concreto con microesferas

lote de concreto de 0,76 m³ (1 yd³), por ejemplo, se requiere agregar a la mezcla un saco de 20 L (0,71 pies³). Pueden utilizarse otros tamaños de sacos según se considere apropiado. Este método de dispensar la mezcla de polvo en una mezcla de concreto facilita la manipulación y elimina cualquier problema relacionado con la formación de polvillo del material. Este método también facilita la adición de la cantidad adecuada de mezcla de polvo de microesferas, simplemente contando el número de sacos añadidos, en lugar de pesar el polvo para cada lote de concreto producido. Además, el ensayo de los lotes que contienen diversas dosis, muestra que el método de ensayo ASTM C173/C173M modificado, puede utilizarse para verificar el contenido de microesferas en el concreto antes de su colocación (Fig. 7). Una capa de microesferas se acumula en el cuello graduado del medidor volumétrico bajo una pequeña capa de espuma. El grosor de la capa de microesferas, en porcentaje de volumen del concreto, proporciona una medida del contenido de microesferas en el concreto. Las evaluaciones preliminares realizadas para este estudio mostraron que para un contenido de microesferas de 1,0% por volumen de concreto, los valores medidos estaban en el rango de 1,0 ± 0,1%. Las pruebas realizadas con el dispositivo de pruebas SAM mostraron que las mezclas de concreto sin aire incluido con microesferas tenían números similares de SAM que las mezclas

sin microesferas. Esto implica que las presiones utilizadas en la prueba no son lo suficientemente altas como para comprimir las microesferas y producir lecturas que variarían con el contenido de microesferas del concreto. Como tal, la prueba SAM no resulta un método apropiado para controlar la calidad del concreto con microesferas. El recuento detallado del número de sacos de la mezcla de polvo con microesferas añadidos a un lote de concreto, en conjunto con la realización de la prueba ASTM C173/C173M sin utilizar alcohol isopropílico, verificaría que las microesferas se encuentran presentes en la cantidad correcta, antes de la colocación del concreto.

Beneficios Potenciales

Beneficios ambientales

Además de eliminar los problemas prácticos que se presentan en el aire incluido, la mezcla de polvo con microesferas permitiría también la utilización a gran escala de cenizas volantes con alto contenido de carbono sin quemar, como material cementante suplementario⁹. Esas cenizas volantes de baja calidad suelen depositarse en vertederos, ya que se consideran inutilizables sin más tratamiento, porque dificultan o imposibilitan la inclusión de aire en el concreto. Además, el uso de la mezcla de polvo con microesferas para reemplazar un volumen igual de arena, mientras se logra un concreto resistente a los ciclos H-D contribuiría a la conservación de la arena de concreto como un recurso natural.

Beneficios de Construcción

El allanado vigoroso de los pisos o losas de concreto con aire incluido conduce al riesgo de reducir el contenido de aire en la superficie, así como de desconchamiento o formación de burbujas. El uso de la mezcla de polvo con microesferas en lugar de la intrusión de aire debería permitir especificar superficies densas, pulidas y maquinadas para las losas de concreto en ambientes que podrían estar en riesgo de exposición a ciclos de H-D. Además, el concreto compactado con rodillo y el concreto permeable que son difíciles de transportar debido a su consistencia rígida^{12,13} pueden hacerse durables contra ciclos de H-D con la adición de la mezcla de polvo con microesferas. Recientemente se ha demostrado que las burbu-



Fig. 7: El contenido de microesferas de una mezcla de concreto puede ser evaluado utilizando un medidor volumétrico

jas de aire se disuelven en el concreto fresco cuando se bombea el concreto, pero se reforman antes de que el concreto se endurezca¹⁴. Como tal, el contenido de aire del concreto endurecido tendería a ser más alto que el contenido de aire del concreto fresco medido después del bombeo. Esta observación también puede ser aplicable al concreto lanzado con mezcla húmeda, que se utiliza en una variedad de aplicaciones estructurales y de reparación¹⁵. Dado que la mezcla de polvos con microesferas ofrecerá una protección más confiable y robusta del concreto bombeado contra los daños causados por el H-D, eliminaría los problemas de producción y colocación relacionados con el bombeo de concreto con aire incluido.

Observaciones Finales

Los trabajos presentados aquí y en la Referencia 6 muestran que el recubrimiento previo de las microesferas poliméricas expandidas en seco mediante la mezcla con un polvo mineral puede reducir al mínimo la aglomeración de las microesferas y promover su dispersión y distribución uniforme en una mezcla de concreto. El uso de un saco que se disuelve para dispensar el material en una mezcla de concreto facilita la adición de la cantidad adecuada del polvo de microesferas en un lote de concreto simplemente contando el número de sacos añadidos en lugar de pesar el polvo por cada lote de concreto producido.

Las pruebas cíclicas de H-D y del desconchamiento por sales de deshielo muestran que la mezcla de polvo con microesferas, con un contenido de microesferas del 1,0% en volumen de concreto, es tan efectiva como la inclusión de aire para proteger al concreto de los daños del H-D, pero no está cargada con las incertidumbres asociadas con la inclusión de aire. Al realizar la prueba ASTM C173/C173M modificada sin alcohol isopropílico se comprobaría que las microesferas están presentes en la cantidad correcta antes de la colocación del concreto.

Además, como se muestra en la Referencia 6, la cantidad mínima de microesferas por volumen de concreto necesaria para proteger el concreto de los ciclos de H-D se determina en base al espaciamiento máximo requerido de las partículas. Así, se espera que se cum-

pla el requisito de espaciamiento cuando se utilice en el concreto la cantidad mínima de microesferas calculada a partir de las ecuaciones de la Referencia 6. Por lo tanto, habría que desarrollar un análisis microscópico del contenido y la distribución de las microesferas en el concreto endurecido basado en la norma ASTM C457/C457M, "Método de prueba estándar para la determinación microscópica de los parámetros de los sistemas de vacíos de aire en el concreto endurecido". Habría que establecer un rango de amplificación apropiado para utilizarlo en la evaluación microscópica del concreto con microesferas, porque las microesferas son mucho más pequeñas que el tamaño típico de los vacíos de aire incluido. Las evaluaciones preliminares de los concretos que contienen microesferas, utilizando el método de prueba vigente ASTM C457/C457M a mayores amplificaciones que las utilizadas habitualmente, como 200×, indican que se lograría un nivel aceptable de precisión en la cuantificación de las cantidades de microesferas en los concretos endurecidos.

Agradecimientos

Se reconoce con gratitud el apoyo de SGS TEC Services, Lawrenceville, GA, USA, en particular el del Director General del laboratorio Shawn McCormick, en la realización de las pruebas al concreto.

Referencias

1. de Rook, P., "Process for Preparing Frost Resistant Concrete," U.S. Patent No. 4,057,526, Nov. 1977.
2. Ozyildirim, C.H., and Sprinkel, M.M., "Investigation of Concrete Mixtures Incorporating Hollow Plastic Microspheres," Report VH-TRC 82-R7, Virginia Highway and Transportation Research Council, Charlottesville, VA, 1981, 38 pp.
3. Bury, M.A.; Ong, F.; Attiogbe, E.; Nmai, C.; and Smith, J., "Microsphere-Based Admixture for Durable Concrete," *Concrete International*, V. 36, No. 3, Mar. 2014, pp. 59-63.
4. Ong, F.S.; Attiogbe, E.K.; Nmai, C.K.; and Smith, J.C., "Freezing and Thawing Behavior of Cementitious Systems with New Polymeric Microsphere-Based Admixture," *ACI Materials Journal*, V. 112, No. 6, Nov.-Dec. 2015, pp. 735-743.
5. Moffat, E.G., and Thomas, M.D.A., "Polymeric Microspheres Provide Resistance to Harsh Winter Conditions,"

Concrete International, V. 41, No. 1, Jan. 2019, pp. 36-41.

6. Attiogbe, E.K., "Compliance Concept in Protection of Concrete from Freezing-and-Thawing Damage," ACI Materials Journal, V. 117, No. 6, Nov.-Dec. 2020, doi: 10.14359/51726995.

7. Attiogbe, E.K., "Method of Delivery of Dry Polymeric Microsphere Powders for Protecting Concrete from Freeze-Thaw Damage," U.S. Patent No. 10,730,794 B1, Aug. 2020.

8. "Frequently Asked Questions," BillerudKorsnäs AB, Solna Sweden. www.billerudkorsnas.com/our-offer/packaging-solutions/sacksolutions/d-sack/d-sack-faq. Accessed Nov. 23, 2020.

9. Ong, F.S.; Nmai, C.K.; Smith, J.C.; and Luciano, J., "Microspheres-Based Admixture for Freeze-Thaw Durability of Concrete," Thirteenth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, SP-303, T.C. Holland, P.R. Gupta, and V.M. Malhotra, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, pp. 255-268.

10. 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.

11. "Material Specification for Aggregates—Concrete," OPSS.PROV 1002, Ministry of Transportation, Toronto, ON, Canada, 2012, 15 pp.

12. Service d'Expertise en Matériaux Inc., "Frost Durability of Roller-Compacted Concrete Pavements," RD135, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2004, 140 pp.

13. Kevern, J.T.; Wang, K.; and Schafer, V.R., "Test Methods for Characterizing Air Void Systems in Portland Cement Pervious Concrete," Recent Advancement in Concrete Freezing-Thawing (F-T) Durability, K. Wang, ed., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, pp. 119-134.

14. Becker, J., and Ley, T., "Concrete Pumping Effects on Air-Entrained Voids in Concrete Mixture," Report No. SPTC14.1-38-F, Southern Plains Transportation Center, Norman, OK, 2019, 41 pp.

15. Talukdar, S., and Heere, R., "The Effects of Pumping on the Air Content and Void Structure of Air-Entrained, Wet Mix Fibre Reinforced Shotcrete," Case Studies in Construction Materials, V. 11, Dec. 2019, 6 pp.

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



Emmanuel K. Attiogbe, FACI, es un Ingeniero de Investigación con práctica privada en Discovery Bay, CA, USA. Anteriormente, fue Jefe de Innovación para el desarrollo de refuerzos alternativos para el concreto en BASF Construction Chemicals, ahora Master Builders Solutions. Ha sido Presidente del Comité de Transferencia de Tecnología del TAC y del Grupo Asesor de Transferencia de Tecnología de la Consejo de Desarrollo Estratégico de la Fundación ACI, y ha sido miembro de la Junta Directiva de la ACI. Es miembro de varios comités del ACI y del Consejo de Investigación del Concreto de la Fundación ACI. Se le concedió la Medalla Wason de la ACI de 1995 por la Investigación de Materiales y el Premio Henry L. Kennedy de la ACI en 2015. 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, USA

La traducción de este artículo correspondió a la Sección México Noreste.

Título: Una nueva forma de protección contra los daños por hielo-deshielo.



Traductor: Lic. Iliana M Garza Gutiérrez



Revisor Técnico: Dr. Alejandro Durán Herrera