

Air-Entrained Concrete and Its Air-Void System

by N. Subramanian

In cold climates, air-entraining admixtures (AEAs) protect concrete from cyclic freezing and thawing. As the concrete is mixed, these admixtures produce air bubbles ranging in size from 5 to 80 microns and are uniformly distributed throughout the cement paste (Fig. 1).

AEAs can also be used in warmer climates. In India, for example, air-entrained concrete was used in the construction of dams such as the Hirakud Dam (Fig. 2), Koyna Dam, and Rihand Dam, even though frost damage is not a serious concern.¹

This article discusses key points about air-entrained concrete, advantages of air entrainment, the effects of supplementary cementitious materials (SCMs) on the required AEA dosage, and the effects of production and construction variables on air content. Parameters such as total air content, air-void size and distribution, spacing factor, and specific surface are also explained; testing methods and relevant specifications are provided; and alternatives to AEAs are summarized.

Accidental Discovery of Air Entrainment

Air entrainment was accidentally discovered in the mid-1930s, when it was found that tallow being used as a grinding aid in cement production created soap, producing tiny air bubbles when mixed with water.²⁻⁴

In 1945, T.C. Powers proposed a hypothesis regarding the mechanism of frost damage in concrete.⁵ This hypothesis was later revised in 1950 to include requirements for the air-void system,⁶ and it remains the basis for many current air-entrainment practices.⁷

Key Points About Air-Entrained Concrete

Air entrainment is typically achieved by adding AEAs to the concrete mixture to form microscopic air bubbles in the cement paste. These bubbles remain after the concrete has hardened. During freezing conditions, water present in concrete pores expands as it turns into ice, exerting pressure on the surrounding concrete matrix. Entrained air voids act as reservoirs or empty chambers within the concrete paste. When freezing occurs, water migrates into these air voids, relieving pressure on the concrete matrix and preventing cracking and

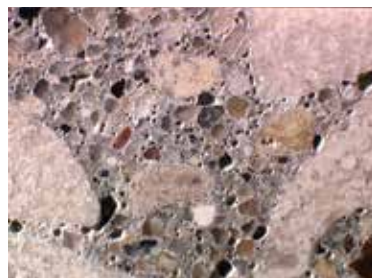


Fig. 1: Air-entrained concrete (courtesy of Paul Stutzman, National Institute of Standards and Technology [NIST])



Fig. 2: Hirakud Dam, Sambalpur, Odisha, India (photo courtesy of P.K. Mallick)

concrete deterioration. The air trapped within the voids also compresses. Upon thawing, the ice in the air voids melts and the compressed air expands, releasing the water back into the capillaries of the concrete through capillary action.⁸

Advantages of Air Entrainment

Some of the advantages of entrained air in concrete include:

- **Freezing-and-thawing resistance**—Air-entrained concrete better withstands the expansion and contraction that occurs during freezing-and-thawing cycles, reducing the likelihood of surface scaling and spalling;
- **Improved workability**—The presence of air voids enhances the workability of fresh concrete, making it easier to place and finish;
- **Reduced permeability**—Air-entrained concrete typically exhibits lower permeability, which can help to minimize water penetration and enhance resistance to chemical attack and reinforcement corrosion;

- **Enhanced cohesion**—Air voids act as lubricants, reducing internal friction within the concrete mixture and improving cohesion between particles; and
- **Other benefits**—Air-entrained concrete typically exhibits reduced bleeding and segregation.

Mixture Design Considerations

Proper mixture design is essential for achieving the desired air void content and performance characteristics of air-entrained concrete. Exposure classes and relevant requirements should be included in contract documents. For example, per Section 4.2.2.6(c) in ACI SPEC-301-20 in Mandatory Requirements Checklist on Concrete Mixtures:

“Designate in Contract Documents the exposure class or specify requirements for concrete mixtures for portions of the structure requiring resistance to freezing and thawing. For Exposure Class F3 [concrete exposed to freezing-and-thawing cycles with frequent exposure to water and exposure to deicing chemicals], indicate if it is plain concrete. Refer to ACI 318.”⁹

Due to factors such as cement or cementitious materials content, water-cementitious materials ratio (w/cm), and aggregate type, the dosage of AEA must be carefully controlled.

AEA addition

According to ACI E4-22,¹⁰ the AEA dosage ranges typically from 15 to 130 mL per 100 kg (0.23 to 0.2 fl oz per 100 lb) of cementitious material. Higher or lower dosages may be required when fly ash or other pozzolans are used to achieve the same air content compared to a similar concrete using only portland cement. In any case, trial mixtures should be performed to ensure compatibility between AEAs and other concrete components, including other chemical admixtures. The amount used will depend on materials, mixture proportions, and mixing conditions.

Mixtures with water-cement ratios (w/c) of 0.4 to 0.6 have been found to produce adequate air bubbles.¹ Water hardness may also affect AEAs, just as it affects bath soap.

Fluctuations in sand gradation will also cause modifications in the air content. Consistent proportions of aggregates passing the No. 30 and No. 100 sieves are critical for consistent air entrainment.¹⁰ Significant changes in these particle sizes make it difficult to control the air content. Variations in sulfate content and fineness of cement will cause changes in the air content. The typical relationship between 28-day compressive strength and w/c for a wide variety of air-entrained concretes with recommended percentage of entrained air is shown in Fig. 3(a), and compressive strength at 90 days and air content with different w/c is shown in Fig. 3(b).^{11,12}

Effect of supplementary cementitious materials

Class F fly ash typically demands higher levels of AEAs to maintain desired entrained air levels compared to Class C fly ash.¹³ Silica fume is another material that influences air entrainment in concrete. Its fine particle size and smoothness necessitate higher dosages of AEAs than traditional concretes without silica fume—typically 125 to 150% of the dosage used in traditional concretes.¹⁴ Similarly, use of slag cement and rice husk ash in concrete mixture designs will also require a higher AEA dosage.¹⁴ Table 1 shows the effects of some concrete ingredients on air content.¹³

The way concrete is produced and handled can also have a significant effect on its air content and entrained air-void system. Concrete production variables that may affect the air content and the performance include the methods of batching, mixing procedures, and time and speed of mixing. Often, AEAs are applied by dispensing the admixture on the sand during mixing. This application method generates stable air content.

Construction-related variables and field conditions include transport and delivery, retempering, placement, consolidation, finishing, and temperature. Table 2 shows the effect of some of these variables on air content.¹³ Two mechanisms have been found to be responsible for reducing air content in concrete during the pumping process—the dissolution mechanism, and mechanical rupture on strike with a surface.¹⁵

Fig. 3: Compressive strength:
(a) at 28 days and w/c for a wide variety of air-entrained concretes using Type I cement (from Reference 11); and
(b) at 90 days and air content (from Reference 12) (Figures courtesy of the American Cement Association)

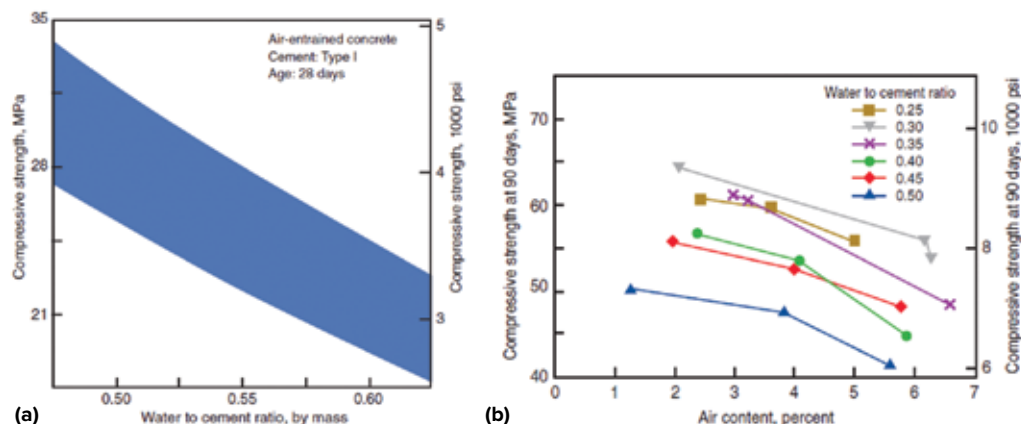


Table 1:
Effects of concrete ingredients on air content (based on Reference 13)

Material		Effects	Guidance
Cement	Alkali content	Increase in air content with increase in alkali level	Changes in alkali content require adjustments of the AEA dosages
	Fineness	Decrease in air content with increased fineness	Changes in cement source or fineness require adjustments in the AEA quantity
	Cement content	Decrease in air content with increase in cement content	Increase AEA dosage
Fly ash	—	Decrease in air content with increase in loss on ignition (LOI) (carbon content)	Changes in LOI or fly ash source require adjustments in the AEA quantity
Water-reducing admixtures	—	Increase in air content with increase in dosage of lignin-based water-reducing admixtures	Reduce AEA dosage
Aggregates	—	Increase in air content with increase in sand content	Reduce AEA dosage

Table 2:
Effects of production and construction variables on air content (based on Reference 13)

Variable	Effects	Guidance
Mixer capacity	Air content increases as capacity is approached	Run mixers close to full capacity. Do not over-load mixers
Temperature	Air content decreases with increase in temperature	Increase AEA dosage as temperature increases
Haul time agitation	Long hauls, even without agitation, reduce air content especially in hot weather	Optimize delivery schedules. Maintain concrete temperature in recommended ranges
Pumping	Reduction in air content at 2 to 3%	Use loop in descending pump line. Keep the pumping pressure as low as possible
Internal vibration	Air content decreases under prolonged vibration or at high frequencies; 50% of entrained air may be lost after 2.5 minutes of vibration and 80% lost after 9 minutes	Do not over vibrate. Avoid high-frequency vibrators (>10,000 vpm)

Air-Void Parameters

Air-void parameters play a crucial role in ensuring the durability and performance of concrete, both in its fresh and hardened states. Once the concrete sets, the original air bubbles leave behind voids in the hardened concrete. The major parameters for the air-void system include the total air content, spacing factor, specific surface, and air-void size and distribution.

Total air content

The total air content refers to the volume of air present in the concrete mixture. It includes both entrained air (deliberately incorporated during mixing) and any entrapped air (air trapped unintentionally). Achieving the desired air content involves attention during the design, specification, and construction stages. Table 3 shows

general recommendations on total air content for concrete. IS 9103:1999¹⁶ stipulates that in air-entrained concrete, an air content of 6% should be used. Air content of about 4% may achieve the required workability and reduced bleeding.¹ Shetty¹ recommends that for reinforced concrete of relatively high cement content, a limit of 3 to 4% of air content is adequate, as the strength will be compromised beyond this limit. In addition, as shown in Table 3, as the aggregate size increases, the air content requirement reduces to achieve the desired results.

Spacing factor

The spacing factor represents the relative distance between individual air voids within the concrete. Smaller spacing factors are preferable because they reduce the distance that water would need to travel before entering an air void, thus

Table 3:
Recommended total air content for concrete exposed to cycles of freezing and thawing (based on Table 4.2.2.6(c)1 in ACI SPEC-301-20⁹)

Nominal maximum aggregate size, mm (in.)	Air content, %**	
	Exposure Classes F2 [‡] and F3 [§]	Exposure Class F1 [#]
10 (3/8)	7.5	6.0
12.5 (1/2)	7.0	5.5
20 (3/4)	6.0	5.0
25 (1.0)	6.0	4.5
37.5 (1-1/2)	5.5	4.5
50 (2)	5.0	4.0
75 (3)	4.5	3.5

*Tolerances on air content as delivered shall be within $\pm 1.5\%$ of these target values

[†]For ≥ 5000 psi (34.5 MPa), it is acceptable to reduce air content by 1.0%

[‡]F2 designates concrete exposed to freezing-and-thawing cycles with frequent exposure to water

[§]F3 designates concrete exposed to freezing-and-thawing cycles with frequent exposure to water and exposure to deicing chemicals

[#]F1 designates concrete exposed to freezing-and-thawing cycles with limited exposure to water

minimizing pressure. A spacing factor of less than 0.200 mm (0.008 in.) is believed necessary for maintaining freezing-and-thawing durability.^{11,16}

Specific surface

The specific surface indicates the relative number and size of air bubbles within a given volume of air. A larger specific surface value is better because it corresponds to a greater number of small bubbles. A specific surface greater than 24 mm²/mm³ (600 in.²/in.³) is considered essential for freezing-and-thawing durability.^{10,16}

Testing and Specifications

Various standards and specifications govern the testing and requirements for air-entrained concrete. Per ASTM C172/C172M, the minimum sample size for air content testing of fresh concrete should be 28 L (1 ft³), and the sample should not be taken from the very first or last portions of the batch.¹⁷ Per ASTM C94/C94M, a sample should be obtained for every 115 m³ (150 yd³) of concrete, at least once per day.¹⁸

The gravimetric method, correlating mixture density and air content, is the oldest method of determining air content of fresh concrete (ASTM C138/C138M¹⁹). Currently, air content in fresh concrete is commonly measured using the pressure method (ASTM C231/C231M²⁰) or the volumetric air meter (ASTM C173/C173M²¹).

An additional pressure method, known as the sequential air



Fig. 4: The sequential air method (SAM) meter (photo courtesy of Tyler Ley, Oklahoma State University)

method (SAM) test, extends the standard ASTM C231/C231M pressure method using a modified meter (refer to Fig. 4). After determining total air content per ASTM C231/C231M, two additional pressure stages are applied. The pressure differentials correlate with air-void spacing and size distribution.²² Air-void characteristics may also be evaluated using AASHTO T 348.²³

When air content in fresh concrete is compared to air content in hardened concrete, differences can exist.¹³ These differences may be due to air bubble stability; environmental factors like temperature and pressure; and handling procedures, including mixing, delivery, placement, and consolidation.¹⁵

The parameters of the air void system in hardened concrete can be evaluated using ASTM C457/C457M,²⁴ RapidAir, a flatbed scanner, and computerized tomography scanning. More details of different types of testing procedures can be found in References 25 through 27. The effect of air entrainment on fresh and hardened properties of cement-based materials such as workability, rheology, compressive strength (it is found to decrease by 4 to 6% with every 1% increase in air content), freezing-and-thawing resistance, and fire resistance may be found in Reference 15.

Pumping of Air-Entrained Concrete

When concrete is conveyed through a pump, it is normal to experience a loss of about 0.5 to 1.0% of entrained air. The transition from high pressure in the pump to near-vacuum conditions in the nearly vertical downward sections of pipe can result in air loss at discharge. Field experience suggests that air loss is more significant with high cement content and flowable concrete mixtures. However, if the air-void system is not compromised, this loss does not reduce freezing-and-thawing durability.²⁸ To minimize the negative influence of pumping on air-entrained concrete, several measures should be taken:

- Maintaining lowest possible pumping pressure;
- Minimizing freefall within the pipeline;
- Reducing impact effects by discharging directly into previously placed concrete; and
- Limiting discharge height to a maximum of 1 m (3 ft).²⁹

It should be noted, however, that a study of pumping effects on laboratory mixtures has indicated that air-void parameters and freezing-and-thawing performance do not show substantial changes as the result of pumping.³⁰

Alternatives to AEAs

Polymer microspheres have also been shown to protect concrete from cyclic freezing-and-thawing damage, even at relatively low volume fractions. These systems are not impacted by the factors that render air entrainment with surfactants problematic (refer to Table 1). Further, these particles create void spaces that will remain largely unsaturated, even under long-term exposure to fluid.³¹⁻³³

Summary and Conclusions

Air-entrained concrete offers significant durability and performance benefits, and it is commonly specified for outdoor pavements, sidewalks, driveways, and other structures exposed to freezing-and-thawing cycles. It is also used in marine environments, bridge decks, and areas subjected to deicing salts or chemical exposure. Air-entraining admixtures (AEAs) can also provide advantages during construction. For example, air-entrainment improves the performance of mortars used for plastering projects.¹

The selection of appropriate AEAs is crucial to ensure compatibility with the raw materials of concrete mixtures and the service environment. Factors such as desired air content, properties of cement/cementitious materials and aggregates, environmental conditions, and specific application requirements influence the choice and dosage of AEAs. Testing should be conducted to ensure compatibility with other chemical admixtures and materials in the concrete mixture.

It is also desirable to determine the optimal addition sequence and employ appropriate mixing methods. Overall, careful consideration of AEAs, compatibility testing, and mixing methods ensures the effectiveness and longevity of air-entrained concrete structures. Specifiers should also consider alternatives to AEAs, such as polymer microspheres, to overcome many of the associated challenges.

References

1. Shetty, M.S., *Concrete Technology-Theory and Practice*, S. Chand & Company Ltd., New Delhi, India, 2005, pp. 158-174.
2. "Effect of Air Entrainment on Concrete Strength," The Constructor, <https://theconstructor.org/concrete/effect-air-entrainment-concrete-strength/8427/>.
3. Klieger, P., "Air Entraining Admixtures," *STP 169-A*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1966, pp. 530-542.
4. Du, L., and Folliard, K.J., "Mechanisms of Air Entrainment in Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 35, No. 8, Aug. 2005, pp. 1463-1471.
5. Powers, T.C., "A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 41, No. 1, Feb. 1945, pp. 245-272.
6. Powers, T.C., "The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete," *Highway Research Board Proceedings*, V. 29, 1950, pp. 184-211.
7. Tunstall, L.E.; Ley, M.T.; and Scherer, G.W., "Air Entraining Admixtures: Mechanisms, Evaluations, and Interactions," *Cement and Concrete Research*, V. 150, Dec. 2021.
8. Lerch, W., *Basic Principles of Air-Entrained Concrete*, American Cement Association, Washington, DC, 1960, 21 pp.
9. ACI Committee 301, "Specifications for Concrete Construction (ACI SPEC-301-20)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 69 pp.
10. ACI Committee E701, "Chemical Admixtures for Concrete (ACI E4-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2022, 14 pp.
11. Wilson, M.L., and Tennis, P.D., *Design and Control of Concrete Mixtures*, Engineering Bulletin, EB001.17, 17th edition, American Cement Association, Washington, DC, 2016, 600 pp.
12. Pinto, R.C.A., and Hover, K.C., *Frost and Scaling Resistance of High-Strength Concrete*, RD 122, American Cement Association, Washington, DC, 2001, 70 pp.
13. American Cement Association, "Control of Air Content in Concrete," *Concrete Technology Today*, V. 19, No. 1, Apr. 1998, 4 pp.
14. Lallas, Z.N.; Gombada, M.J.; and Mendonca, F., "Review of Supplementary Cementitious Materials with Implications for Age-Dependent Concrete Properties Affecting Precast Concrete Production," *PCI Journal*, V. 68, No. 6, Nov.-Dec. 2023, pp. 46-64.
15. Shah, H.A.; Yuan, Q.; and Zuo, S., "Air Entrainment in Fresh Concrete and Its Effects on Hardened Concrete—A Review," *Construction and Building Materials*, V. 274, Mar. 2021, 17 pp.
16. IS 9103:1999 (Reaffirmed 2018), "Concrete Admixtures-Specification," Bureau of Indian Standards, Old Delhi, India, 1999, 11 pp.
17. ASTM C172/172M-17, "Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 3 pp.
18. ASTM C94/C94M-24d, "Standard Specification for Ready-Mixed Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 16 pp.
19. ASTM C138/C138M-24a, "Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 6 pp.
20. ASTM C231/C231M-24, "Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 10 pp.
21. ASTM C173/C173M-24a, "Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 10 pp.
22. Ley, M.T.; Welch, D.; Peery, J.; Khatibmasjedi, S.; and LeFlore, J., "Determining the Air-Void Distribution in Fresh Concrete with the Sequential Air Method," *Construction and Building Materials*, V. 150, 2017, pp. 723-737.
23. AASHTO T 348-22, "Standard Test Method for Air-Void Characteristics of Freshly Mixed Concrete by Buoyancy Change," AASHTO, Washington, DC, 2022, 13 pp.
24. ASTM C457/C457M-24, "Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 17 pp.
25. EN 480-11:2005, "Admixtures for Concrete, Mortar and Grout, Test Methods, Part 11: Determination of Air Void Characteristics in

Hardened Concrete,” European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005, 22 pp.

26. Price, B., “Measuring Air Voids in Fresh Concrete,” *Concrete*, V. 30, No. 4, 1996, pp. 29-31.

27. Li, H.-J.; Xie, Y.-J.; and Yang, L., “Air-Void Parameters Measurement of Fresh Concrete and Hardened Concrete,” *Journal of Central South University*, V. 20, Apr. 2013, pp. 1103-1108.

28. NRMCA, “CIP 21: Loss of Air Content in Pumped Concrete,” National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2005, 2 pp.

29. ACI Committee 304, “Guide to Placing Concrete by Pumping Methods (ACI PRC-304.2-17),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2017, 20 pp.

30. Becker, J.; Ley, M.T.; and Cook, D., “Air-Void Parameters in Fresh and Hardened Concrete from Pumping,” *ACI Materials Journal*, V. 121, No. 4, July 2024, pp. 27-36.

31. He, R., and Lu, N., “Air Void System and Freezing-Thawing Resistance of Concrete Composite with the Incorporation of Thermo-Expansive Polymeric Microspheres,” *Construction and Building Materials*, V. 419, Mar. 2024, 15 pp.

32. 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.

33. Attiogbe, E.K., “Microspheres in Hardened Concrete,” *Concrete International*, V. 44, No. 3, Mar. 2022, pp. 43-50.

Selected for reader interest by the editors.



ACI member **N. Subramanian** is a consulting engineer in Maryland, USA. He has 46 years of professional experience, which includes teaching, research, and consulting in India and abroad. Subramanian has authored 25 books and more than 320 technical papers published in international and Indian journals and conference proceedings. He received the

Tamilnadu Scientist Award in 2001, the Lifetime Achievement Award from the Indian Concrete Institute (ICI) in 2013, and the Edmund Friedman Professional Recognition Award from the American Society of Civil Engineers (ASCE) in 2024. He also served as Vice President of ICI and the Association of Consulting Civil Engineers (India). He received his PhD from the Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India, in 1978.

MASONRY BUILDING CODE REQUIREMENTS

ACI Offers All Recent Editions of Masonry Building Code Requirements

The American Concrete Institute offers the 2016, 2013, and 2011 editions of Building Code Requirements for Masonry Structures. Available in both print and digital formats.



Learn more at
www.concrete.org



American Concrete Institute
Always advancing

Concreto con aire incluido y su sistema de vacíos de aire

Por N. Subramanian

En climas fríos, los aditivos inclusores de aire (AIA) protegen al concreto de los ciclos de congelamiento y deshielo. Conforme se mezcla el concreto, estos aditivos producen burbujas de aire de un tamaño de entre 5 y 80 micras que se distribuyen uniformemente por toda la pasta de cemento (Fig. 1).

Los AIA también se pueden utilizar en climas más cálidos. En la India, por ejemplo, se utilizó concreto con aire incluido en la construcción de presas como la Hirakud (Fig. 2), la Koyna y la Rihand, aunque los daños causados por las heladas no son un problema grave¹.

Este artículo analiza los puntos clave sobre el concreto con aire incluido, las ventajas de la inclusión de aire, los efectos de los materiales cementantes suplementarios (SCM) en la dosis requerida de AIA y los efectos de las variables de producción y construcción en el contenido de aire. También se explican parámetros como el contenido total de aire, el tamaño y la distribución de los huecos de aire, el factor de espaciamiento y la superficie específica; se proporcionan métodos de ensayo y especificaciones pertinentes; y se resumen las alternativas a los AIA.

Descubrimiento accidental de la inclusión de aire

La incursión de aire se descubrió accidentalmente a mediados de la década de 1930, cuando se observó que el sebo utilizado como auxiliar para la molienda en la producción de cemento creaba jabón, lo que producía pequeñas burbujas de aire al mezclarse con agua²⁻⁴.

En 1945, T.C. Powers propuso una hipótesis sobre el mecanismo de daño por heladas en el concreto⁵. Esta hipótesis fue revisada posteriormente en 1950 para incluir los requisitos del sistema de vacíos de aire⁶, y sigue siendo la base de muchas prácticas actuales de inclusión de aire⁷.

Puntos clave sobre el concreto con aire incluido

La inclusión de aire se consigue normalmente añadiendo AIA a la mezcla de concreto para formar burbujas de aire microscópicas en la pasta de cemento. Estas burbujas permanecen después de que el concreto se haya endurecido. Durante las condiciones de congelamiento, el agua presente en los poros del concreto se expande al convertirse en hielo, ejerciendo presión sobre la matriz del concreto circundante. Los vacíos de aire incluido actúan como depósitos o cámaras vacías dentro de la pasta de concreto. Cuando se produce el congelamiento, el agua migra hacia estos vacíos de aire, aliviando la presión sobre la matriz de concreto y evitando el agrietamiento y el deterioro del mismo. El aire atrapado dentro de los vacíos también se comprime. Al descongelarse, el hielo de los vacíos de aire se derrite y el aire comprimido se expande, liberando el agua de nuevo a los capilares del concreto a través de la acción capilar⁸.

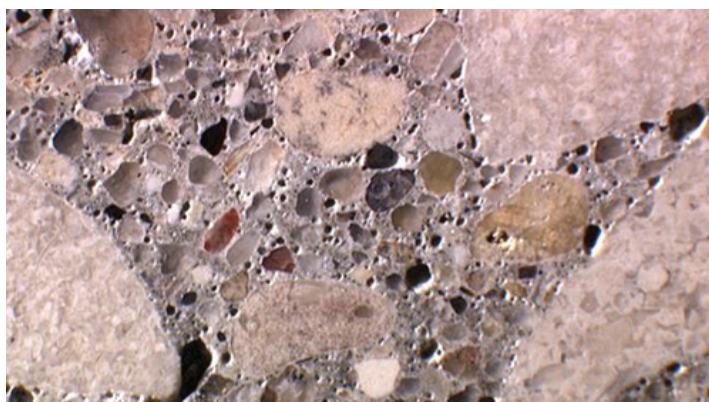


Fig. 1: Concreto con aire incluido (cortesía de Paul Stutzman, National Institute of Standards and Technology [NIST])



Fig. 2: Presa Hirakud, Sambalpur, Odisha, India (foto cortesía de P.K. Mallick)

Ventajas de la inclusión de aire

Algunas de las ventajas del aire incluido en el concreto son:

- **Resistencia al congelamiento-deshielo.** El concreto con aire incluido resiste mejor la expansión y contracción que se produce durante los ciclos de congelamiento y deshielo, lo que reduce la probabilidad de descascaramiento y desprendimiento de la superficie.
- **Trabajabilidad mejorada.** La presencia de vacíos de aire mejora la trabajabilidad del concreto fresco, facilitando su colocación y acabado.
- **Permeabilidad reducida.** El concreto con aire incluido suele presentar una menor permeabilidad, lo que puede ayudar a minimizar la penetración del agua y mejorar la resistencia al ataque químico y a la corrosión del refuerzo.
- **Cohesión mejorada.** Los vacíos de aire actúan como lubricantes, reduciendo la fricción dentro de la mezcla de concreto y mejorando la cohesión entre las partículas, y
- **Otros beneficios.** El concreto con aire incluido suele presentar una reducción del sangrado y la segregación.

Consideraciones sobre el diseño de la mezcla

El adecuado diseño de la mezcla es esencial para lograr la cantidad deseada de vacíos de aire y las características de comportamiento del

concreto con aire incluido. Las clases de exposición y los requisitos pertinentes deben incluirse en los documentos contractuales. Por ejemplo, según la sección 4.2.2.6(c) de la norma ACI SPEC-301-20 en la lista de verificación de requisitos obligatorios para mezclas de concreto:

“Determine en los documentos contractuales la clase de exposición o especifique los requisitos para las mezclas de concreto para las partes de la estructura que requieran resistencia al congelamiento y deshielo. Para la clase de exposición F3 [concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo con exposición frecuente al agua y a productos químicos de deshielo], indique si se trata de concreto simple. Consulte el ACI 318”⁹.

Debido a factores como el contenido de cemento o materiales cementantes, la relación agua-materiales cementantes (a/mc) y el tipo de agregado, la dosificación de AIA debe controlarse cuidadosamente.

Adición de AIA

Según el ACI E4-22,¹⁰, la dosis de AIA suele oscilar entre 15 y 130 ml por cada 100 kg (0.23 a 0.2 fl oz por cada 100 lb) de material cementante. Es posible que se requieran dosis más altas o bajas cuando se utilizan cenizas volantes u otras puzolanas para lograr el mismo contenido de aire en comparación con un concreto similar que utiliza únicamente cemento Portland. En cualquier caso, se deben realizar mezclas de prueba para garantizar la compatibilidad entre los AIA y otros elementos del concreto, incluyendo otros aditivos químicos. La cantidad utilizada dependerá de los materiales, las proporciones de la mezcla y las condiciones del mezclado.

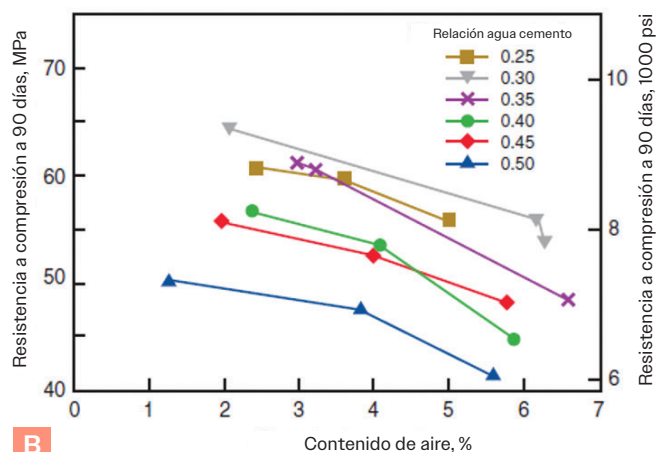
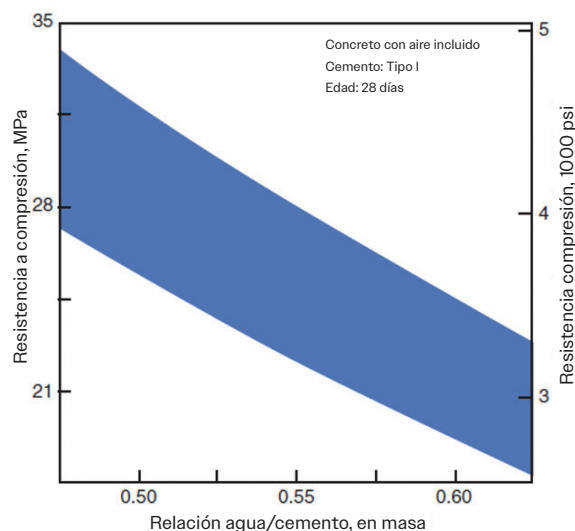


Fig. 3: Resistencia a la compresión: (a) a los 28 días y a/c para una amplia variedad de concretos con aire incluido utilizando cemento Tipo I (uso general) (de la Referencia 11); y (b) a los 90 días y contenido de aire (de la Referencia 12) (Figura cortesía de la Asociación Americana del Cemento)

Se ha descubierto que las mezclas con relaciones agua-cemento (*a/c*) de 0.4 a 0.6 producen burbujas de aire adecuadas¹. La dureza del agua también puede afectar a los AIA, al igual que afecta al jabón de baño.

Las fluctuaciones en la granulometría de la arena también provocarán modificaciones en el contenido de aire. Es fundamental que las proporciones de los agregados que pasan por las mallas No. 30 y 100 sean uniformes para lograr una constante inclusión de aire¹⁰. Los cambios significativos en estos tamaños de partículas dificultan el control del contenido de aire. Las variaciones en el contenido de sulfato y la finura del cemento provocarán cambios en el contenido de aire. La relación típica entre la resistencia a la compresión a 28 días y la relación *a/c* para una amplia variedad de concretos con aire incluido con el porcentaje recomendado de aire incluido se muestra en la Fig. 3(a), y la resistencia a la compresión a 90 días y el contenido de aire con diferentes relaciones *a/c* se muestra en la Fig. 3(b)^{11,12}.

Efecto de los materiales cementantes suplementarios

Las cenizas volantes de Clase F suelen requerir niveles más altos de AIA para mantener los niveles deseados de aire incluido en comparación con las cenizas volantes de Clase C¹³. El humo de sílice es otro material que influye en la inclusión de aire en el concreto. Su tamaño de partícula fina y su textura suave requieren dosis más altas de AIA que los concretos tradicionales sin humo de sílice, normalmente entre el 125 % y el 150 % de la dosis utilizada en los concretos tradicionales¹⁴. Del mismo modo, el uso de cemento de escoria y ceniza de cáscara de arroz en los diseños de mezclas de concreto también requerirá una dosis más alta de AIA¹⁴. La Tabla 1 muestra los efectos de algunos

ingredientes del concreto sobre el contenido de aire¹³.

La forma en que se produce y manipula el concreto también puede tener un efecto significativo en su contenido de aire y en el sistema de vacíos de aire incluido. Las variables de la producción de concreto que pueden afectar el contenido de aire y el comportamiento incluyen los métodos de dosificación, los procedimientos de mezclado y el tiempo y la velocidad de éste. A menudo, los AIA se aplican colocando el aditivo sobre la arena durante el mezclado. Este método de aplicación genera un contenido de aire estable.

Las variables relacionadas con la construcción y las condiciones de campo incluyen el transporte y la entrega, el reacondicionamiento, la colocación, la compactación, el acabado y la temperatura. La Tabla 2 muestra el efecto de algunas de estas variables sobre el contenido de aire¹³. Se ha descubierto que hay dos mecanismos responsables de la reducción del contenido de aire en el concreto durante el proceso de bombeo: el mecanismo de disolución y la ruptura mecánica al golpear una superficie¹⁵.

Parámetros de los vacíos de aire

Los parámetros de los vacíos de aire desempeñan un papel crucial para garantizar la durabilidad y el comportamiento del concreto, tanto en estado fresco como endurecido. Una vez que fragua el concreto, las burbujas de aire originales dejan vacíos en el concreto endurecido. Los principales parámetros del sistema de vacíos de aire son el contenido total de aire, el factor de espaciamiento, la superficie específica y el tamaño y la distribución de los vacíos de aire.

Tabla 1:
Efecto de los ingredientes del concreto sobre el contenido de aire (basado en la Referencia 13)

Material		Efectos	Guía práctica
Cemento	Contenido de álcalis	Aumento del contenido de aire con el incremento del nivel de álcalis	Los cambios en el contenido de álcali requieren ajustes en las dosis de AIA
	Finura	Disminución del contenido de aire con el aumento de la finura	Los cambios en la fuente o la finura del cemento requieren ajustes en la cantidad de AIA
	Contenido de cemento	Disminución del contenido de aire con el aumento del contenido de cemento	Aumentar la dosis de AIA
Ceniza volante	—	Disminución del contenido de aire con aumento de la pérdida por ignición (LOI) (contenido de carbono)	Los cambios en la LOI o en la fuente de la ceniza volante requieren ajustes en la cantidad de AIA
Aditivos reductores de agua	—	Aumento del contenido de aire con el incremento de la dosis de aditivos reductores de agua a base de lignina	Reducir la dosis de AIA
Agregados	—	Aumento del contenido de aire con el incremento del contenido de arena	Reducir la dosis de AIA

Tabla 2:
Efectos de las variables de producción y construcción sobre el contenido de aire (basado en la Referencia 13)

Variable	Efecto	Guía práctica
Capacidad de la mezcladora	El contenido de aire aumenta a medida que se aproxima la capacidad máxima	Haga funcionar las mezcladoras casi a plena capacidad. No sobrecargue las mezcladoras
Temperatura	El contenido de aire disminuye con el aumento de la temperatura	Aumente la dosis de AIA a medida que la temperatura sube
Agitación durante el transporte	Los trayectos largos, incluso sin agitación, reducen el contenido de aire, especialmente cuando hace calor.	Optimizar los plazos de entrega. Mantener la temperatura del concreto dentro de los rangos recomendados
Bombeo	Reducción del contenido de aire entre un 2 y un 3%.	Utilice un bucle en la línea de bombeo descendente. Mantener la presión de bombeo lo más baja posible
Vibración interna	El contenido de aire disminuye bajo vibraciones prolongadas o a altas frecuencias; el 50 % del aire incluido puede perderse tras 2.5 minutos de vibración y el 80 % tras 9 minutos	No vibre en exceso. Evite los vibradores de alta frecuencia (>10 000 vpm)

Tabla 3:
Contenido total de aire recomendado para concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo (basado en la Tabla 4.2.2.6(c)1 de ACI SPEC-301-209)

Tamaño máximo nominal del agregado, mm (pulg.)	Contenido de aire, % [†]	
	Clase de exposición F2 [‡] y F3 [§]	Clase de exposición F1 [#]
10 (3/8)	7.5	6.0
12.5 (1/2)	7.0	5.5
20 (3/4)	6.0	5.0
25 (1.0)	6.0	4.5
37.5 (1-1/2)	5.5	4.5
50 (2)	5.0	4.0
75 (3)	4.5	3.5

*Las tolerancias sobre el contenido de aire en el momento de la entrega deberán estar dentro del ± 1.5 % de estos valores objetivo.

†Para ≥ 5000 psi (34.5 MPa), es aceptable reducir el contenido de aire en un 1.0 %.

‡F2 designa el concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo con exposición frecuente al agua.

§F3 designa el concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo con exposición frecuente al agua y exposición a productos químicos de deshielos.

#F1 designa el concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo con exposición limitada al agua.

Contenido total de aire

El contenido total de aire se refiere al volumen de aire presente en la mezcla de concreto. Comprende tanto el aire incluido (incorporado deliberadamente durante el mezclado) como el aire retenido (aire atrapado involuntariamente). Para lograr el contenido de aire deseado, es necesario prestar atención durante las etapas de diseño, especificación y construcción. La Tabla 3 muestra recomendaciones generales sobre el contenido total de aire para el concreto. La norma IS 9103:1999¹⁶ estipula que en el concreto con aire incluido se debe utilizar un contenido de aire del 6%. Un contenido de aire de aproximadamente el 4% puede lograr la trabajabilidad requerida y reducir el sangrado¹. Shetty¹ recomienda que, para el concreto con acero de refuerzo con un contenido de cemento relativamente alto, un límite de contenido de aire del 3 al 4% es adecuado, ya que la resistencia se verá comprometida más allá de este límite. Además, como se muestra en la Tabla 3, a medida que aumenta el tamaño del agregado, el requisito de contenido de aire se reduce para lograr los resultados deseados.

Factor de espaciamiento

El factor de espaciamiento representa la distancia relativa entre los vacíos de aire individuales dentro del concreto. Son preferibles los factores de espaciamiento más pequeños, ya que reducen la distancia que el agua tendría que recorrer antes de entrar en un vacío de aire, minimizando así la presión. Se cree que es necesario un factor de espaciamiento inferior a 0.200 mm (0.008 pulgadas) para mantener la durabilidad frente al congelamiento y deshielo^{11,16}.



Fig. 4: Equipo para determinar el contenido de aire mediante el método secuencial. (SAM) (foto cortesía de Tyler Ley, Oklahoma State University)

Superficie específica

La superficie específica indica el número relativo y el tamaño de las burbujas de aire dentro de un volumen determinado de aire. Un mayor valor en la superficie específica es mejor, ya que corresponde a un mayor número de burbujas pequeñas. Se considera que una superficie específica superior a $24 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ ($600 \text{ pulg.}^2/\text{pulg.}^3$) es esencial para la durabilidad frente al congelamiento y deshielo^{10,16}.

Ensayos y especificaciones

Existen diversas normas y especificaciones que regulan los ensayos y requisitos del concreto con aire incluido. Según ASTM C172/C172M, el tamaño mínimo de la muestra para el ensayo del contenido de aire del concreto fresco debe ser de 28 L (1 pie³), y la muestra no debe tomarse de las primeras o últimas porciones del lote¹⁷. Según ASTM C94/C94M, se debe obtener una muestra por cada 115 m³ (150 yd³) de concreto, al menos una vez al día¹⁸.

El método gravimétrico, que correlaciona la densidad de la mezcla y el contenido de aire, es el método más antiguo para determinar el contenido de aire del concreto fresco (ASTM C138/C138M¹⁹). Actualmente, el contenido de aire en el concreto fresco se mide comúnmente utilizando el método de presión (ASTM C231/C231M²⁰) o el medidor volumétrico de aire (ASTM C173/C173M²¹).

Un método de presión adicional, conocido como método de aire secuencial (SAM por sus siglas en inglés), amplía el método de presión estándar ASTM C231/C231M utilizando un medidor modificado (véase la Fig. 4). Tras determinar el contenido total de aire según ASTM C231/C231M, se aplican dos etapas de presión adicionales. Los diferenciales de presión se correlacionan con el espaciado y la distribución del tamaño de los vacíos de aire²². Las características de los vacíos de aire también pueden evaluarse utilizando AASHTO T 348²³.

Cuando se compara el contenido de aire en el concreto fresco con el contenido de aire en el concreto endurecido, pueden existir diferencias¹³. Estas diferencias pueden deberse a la estabilidad de las burbujas de aire, a factores ambientales como la temperatura y la presión, y a los procedimientos de manipulación, incluidos el mezclado, la entrega, la colocación y la compactación¹⁵.

Los parámetros del sistema de vacíos de aire en el concreto endurecido pueden evaluarse utilizando ASTM C457/C457M²⁴, RapidAir, un escáner plano y escaneo por tomografía computarizada. En las referencias 25 a 27 pueden encontrarse más detalles sobre los distintos tipos de procedimientos de ensayo. El efecto de la inclusión de aire en las propiedades en estado fresco y endurecido de los materiales a base de cemento, como la trabajabilidad, la reología, la resistencia a la compresión (se ha comprobado que disminuye entre un 4 y un 6% con cada aumento del 1% en el contenido de aire), la resistencia al congelamiento y deshielo y la resistencia al fuego, puede consultarse en la Referencia 15.

Bombeo de concreto con aire atrapado

Cuando el concreto se transporta a través de una bomba, es normal experimentar una pérdida de alrededor del 0.5 al 1.0% del aire incluido. La transición de alta presión en la bomba a condiciones casi de vacío en las secciones descendentes casi verticales de la tubería puede dar lugar a pérdidas de aire en la descarga. La experiencia de campo sugiere que la pérdida de aire es más significativa con alto contenido de cemento y mezclas de concreto fluidas. Sin embargo, si el sistema de vacíos de aire no está comprometido, esta pérdida no reduce la durabilidad al congelamiento y deshielo²⁸. Para minimizar la influencia negativa del bombeo en el concreto con aire incluido, deben tomarse varias medidas:

- Mantener la presión de bombeo lo más baja posible;
- Minimizar la caída libre dentro de la tubería;
- Reducir los efectos del impacto descargando directamente en el concreto previamente colocado; y
- Limitar la altura de descarga a un máximo de 1 m (3 pies)²⁹.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que un estudio de los efectos del bombeo en mezclas de laboratorio ha indicado que los parámetros de vacíos de aire y el comportamiento ante el congelamiento y deshielo no muestran cambios sustanciales como resultado del bombeo³⁰.

Alternativas a los AIA

También se ha demostrado que las microesferas poliméricas protegen al concreto de los daños cíclicos por congelamiento y deshielo, incluso en fracciones de volumen relativamente bajas. Estos sistemas no se ven afectados por los factores que hacen problemático la inclusión de aire con tensioactivos (véase la Tabla 1). Además, estas partículas crean espacios vacíos que permanecerán en gran medida insaturados, incluso bajo una exposición prolongada al fluido³¹⁻³³.

Resumen y conclusiones

El concreto con aire incluido ofrece ventajas significativas de durabilidad y desempeño, y se especifica comúnmente para pavimentos exteriores, aceras, calzadas y otras estructuras expuestas a ciclos de congelamiento y deshielo. También se utiliza en ambientes marinos, cubiertas de puentes y áreas sometidas a sales de deshielo o exposición química. Los aditivos inclusores de aire (AIA) también pueden aportar ventajas durante la construcción. Por ejemplo, los aditivos inclusores de aire mejoran el comportamiento de los morteros utilizados en los proyectos de repellado¹.

La selección de los AIA adecuados es crucial para garantizar la compatibilidad con las materias primas de las mezclas de concreto y el entorno de servicio. Factores como el contenido de aire deseado, las propiedades de los materiales cementantes/ cementos y agregados, las condiciones ambientales y los requisitos específicos de aplicación influyen en la elección y dosificación de los AIA. Deben realizarse ensayos para asegurar la compatibilidad con otros aditivos químicos y materiales en la mezcla de concreto.

También es conveniente determinar la secuencia óptima de dosificación de materiales y emplear métodos de mezclado adecuados. En general, la consideración cuidadosa de los AIA, las pruebas de compatibilidad y los métodos de mezclado garantizan la eficacia y longevidad de las estructuras de concreto con aire incluido. Los especificadores también deberían considerar alternativas a los AIA, como las microesferas de polímero, para superar muchos de los retos asociados.

Referencias

1. Shetty, M.S., Concrete Technology-Theory and Practice, S. Chand & Company Ltd., New Delhi, India, 2005, pp. 158-174.
2. "Effect of Air Entrainment on Concrete Strength," The Constructor, <https://theconstructor.org/concrete/effect-air-entrainment-concretestrength/8427/>.
3. Klieger, P., "Air Entraining Admixtures," STP 169-A, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1966, pp. 530-542.
4. Du, L., and Folliard, K.J., "Mechanisms of Air Entrainment in Concrete," Cement and Concrete Research, V. 35, No. 8, Aug. 2005, pp. 1463-1471.
5. Powers, T.C., "A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete," ACI Journal Proceedings, V. 41, No. 1, Feb. 1945, pp. 245-272.
6. Powers, T.C., "The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete," Highway Research Board Proceedings, V. 29, 1950, pp. 184-211.
7. Tunstall, L.E.; Ley, M.T.; and Scherer, G.W., "Air Entraining Admixtures: Mechanisms, Evaluations, and Interactions," Cement and Concrete Research, V. 150, Dec. 2021.
8. Lerch, W., Basic Principles of Air-Entrained Concrete, American Cement Association, Washington, DC, 1960, 21 pp.
9. ACI Committee 301, "Specifications for Concrete Construction (ACI SPEC-301-20)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 69 pp.
10. ACI Committee E701, "Chemical Admixtures for Concrete (ACI E4-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2022, 14 pp.
11. Wilson, M.L., and Tennis, P.D., Design and Control of Concrete Mixtures, Engineering Bulletin, EB001.17, 17th edition, American Cement Association, Washington, DC, 2016, 600 pp.
12. Pinto, R.C.A., and Hover, K.C., Frost and Scaling Resistance of High-Strength Concrete, RD 122, American Cement Association, Washington, DC, 2001, 70 pp.
13. American Cement Association, "Control of Air Content in Concrete," Concrete Technology Today, V. 19, No. 1, Apr. 1998, 4 pp.
14. Lallas, Z.N.; Gombada, M.J.; and Mendonca, F., "Review of Supplementary Cementitious Materials with Implications for Age-Dependent Concrete Properties Affecting Precast Concrete Production," PCI Journal, V. 68, No. 6, Nov.-Dec. 2023, pp. 46-64.
15. Shah, H.A.; Yuan, Q.; and Zuo, S., "Air Entrainment in Fresh Concrete and Its Effects on Hardened Concrete—A Review," Construction and Building Materials, V. 274, Mar. 2021, 17 pp.
16. IS 9103:1999 (Reaffirmed 2018), "Concrete Admixtures-Specification," Bureau of Indian Standards, Old Delhi, India, 1999, 11 pp.
17. ASTM C172/172M-17, "Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 3 pp.

18. ASTM C94/C94M-24d, "Standard Specification for Ready-Mixed Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 16 pp.
19. ASTM C138/C138M-24a, "Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 6 pp.
20. ASTM C231/C231M-24, "Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 10 pp.
21. ASTM C173/C173M-24a, "Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 10 pp.
22. Ley, M.T.; Welch, D.; Peery, J.; Khatibmasjedi, S.; and LeFlore, J., "Determining the Air-Void Distribution in Fresh Concrete with the Sequential Air Method," *Construction and Building Materials*, V. 150, 2017, pp. 723-737.
23. AASHTO T 348-22, "Standard Test Method for Air-Void Characteristics of Freshly Mixed Concrete by Buoyancy Change," AASHTO, Washington, DC, 2022, 13 pp.
24. ASTM C457/C457M-24, "Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 17 pp.
25. EN 480-11:2005, "Admixtures for Concrete, Mortar and Grout, Test Methods, Part 11: Determination of Air Void Characteristics in Hardened Concrete," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005, 22 pp.
26. Price, B., "Measuring Air Voids in Fresh Concrete," *Concrete*, V. 30, No. 4, 1996, pp. 29-31.
27. Li, H.-J.; Xie, Y.-J.; and Yang, L., "Air-Void Parameters Measurement of Fresh Concrete and Hardened Concrete," *Journal of Central South University*, V. 20, Apr. 2013, pp. 1103-1108.
28. NRMCA, "CIP 21: Loss of Air Content in Pumped Concrete," National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2005, 2 pp.
29. ACI Committee 304, "Guide to Placing Concrete by Pumping Methods (ACI PRC-304.2-17)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2017, 20 pp.
30. Becker, J.; Ley, M.T.; and Cook, D., "Air-Void Parameters in Fresh and Hardened Concrete from Pumping," *ACI Materials Journal*, V. 121, No. 4, July 2024, pp. 27-36.
31. He, R., and Lu, N., "Air Void System and Freezing-Thawing Resistance of Concrete Composite with the Incorporation of Thermo-Expansive Polymeric Microspheres," *Construction and Building Materials*, V. 419, Mar. 2024, 15 pp.
32. 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.
33. Attiogbe, E.K., "Microspheres in Hardened Concrete," *Concrete International*, V. 44, No. 3, Mar. 2022, pp. 43-50.

N. Subramanian, miembro del ACI, es un Ingeniero Consultor en Maryland, USA. Tiene 46 años de experiencia profesional, incluyendo docencia, investigación y consultoría en India y el extranjero. Subramanian ha sido autor de 25 libros y más de 320 artículos técnicos publicados en revistas indias e internacionales y memorias de conferencias. Ha recibido el Tamilnadu Scientist Award en 2001, el Lifetime Achievement Award del Instituto Indio del Concreto (ICI) en 2013, y el Edmund Friedman Professional Recognition Award de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) en 2024. También ha servido como Vicepresidente del ICI y la Asociación de Ingenieros Civiles Consultores (India). Recibió su Doctorado del Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India, en 1978.



Título original en inglés:
**Air-Entrained Concrete and
Its Air-Void System**

**La traducción de este artículo
correspondió al Capítulo México
Noreste**



Traductora:
**Lic. Iliana M. Garza
Gutiérrez**



Revisor Técnico:
**Dr. Francisco D.
Anguiano Pérez**