

# Durability of Portland Limestone Cement Concrete

## Testing mixtures for an infrastructure project

by Neal S. Berke, Ali N. Inceefe, Allan Kramer, and Oscar R. Antommattei

The cement industry in North America is making positive commitments to lower the environmental impacts of cement in several ways: by increased use of alternative fuels, increased use of supplementary cementitious materials (SCMs), the addition of limestone for blended cement production, the initiation of carbon capture technologies, and the practice of hardened concrete recarbonation accounting. All of these sustainable technologies and practices will reduce the carbon footprint of concrete. Even greater, long-term reductions in the carbon footprint of concrete are obtainable by increasing its durability so that concrete structures will not need to be repaired or replaced as frequently. Portland limestone cement (PLC) is fast becoming the main cement used in North America. PLC is included in the ASTM C595/C595M<sup>1</sup> blended cement standard as Type II, which allows replacement of 5 to 15% of the portland cement clinker with natural limestone that is interground with the clinker. This results in a reduction of the carbon footprint of the cement while not impacting the performance of concrete using PLC.

Previously conducted research has shown that concrete made with PLC has good sulfate and alkali-aggregate resistance.<sup>2</sup> In this article, we show more data from an infrastructure project on PLC concrete durability properties, such as resistance to freezing and thawing and chloride ion ingress, for a longer service life.

Concrete for a large light-rail infrastructure project in the Northwest region of the United States was proposed to be switched from using ordinary portland cement (OPC) to PLC. This project had a design target requirement of a 100-year concrete service life. Therefore, it became very important to be able to document that the project's 100-year concrete service life specification requirement could be successfully obtained using PLC.

The work described herein shows that good concrete durability meeting a 100-year service life is obtainable with PLC concretes containing Class F fly ash as an SCM. A few experiments with PLC and ground-granulated blast-furnace slag (slag cement) also gave good concrete durability results (not included). However, because slag cement was not readily available for the project, this study concentrated on the use of Class F fly ash as an SCM.

### Experimental Work Materials

PLC used in this study met the requirements for a Type II blended cement according to ASTM C595/C595M. Fly ash used for this study met the requirements of ASTM C618<sup>3</sup> Class F fly ash. OPC used in this study met the requirements of ASTM C150/C150M<sup>4</sup> for Type I/II cement. Concrete aggregates and admixtures used in this study met the requirements of ASTM C33/C33M<sup>5</sup> and ASTM C494/C494M,<sup>6</sup> respectively. Concrete for testing was produced using a large laboratory concrete mixer at the Corliss Resources, Inc., concrete laboratory located in Sumner, WA, USA. Concrete cylinder samples for durability testing were shipped moist in insulated crates to the Tourney Consulting Group's laboratory in Kalamazoo, MI, USA.

Concrete mixture proportions, plastic properties, and compressive strengths are listed in Tables 1(a) and (b) for mixtures with PLC, and Table 2 for mixtures with Type I/II cement.

### Durability testing

The PLC concrete was to be used in various elements of the light-rail project. The concrete mixture designs were based on exposure to chloride, concrete cover over the reinforcing steel, and freezing-and-thawing conditions for the specific

elements. The aggregates used were not susceptible to alkali-silica reaction (ASR) attack, and sulfate exposure was low, so testing for resistance to these degradation mechanisms was not conducted. The PLC used had good sulfate resistance according to ASTM C1012/C1012M<sup>7</sup> in tests conducted by the cement producer.

The primary concern was ingress of chloride into the concrete that could result in corrosion of steel reinforcement and subsequent cracking and spalling of the concrete.

To determine the susceptibility to chloride ingress, bulk diffusion tests per ASTM C1556<sup>8</sup> were performed. For quality control purposes, a rapid chloride permeability test (RCPT) per ASTM C1202<sup>9</sup> was performed due to the shorter test duration.

The diffusion coefficient tests were performed on 28-day moist-cured concrete samples. In these tests, the ages of the concrete samples at the start of exposure differed from each other by a few days; thus, the apparent diffusion coefficient ( $D_a$ ) values needed to be converted to diffusion coefficient

**Table 1(a):**  
**First group of concrete mixtures with PLC and Class F fly ash (FA)**

Materials or properties	Mixtures						
	1A with 30% FA	1B with 25% FA	1C with 25% FA	4A with 30% FA	4D with 30% FA	4E with 25% FA	4F with 25% FA
<i>w/cm</i>	0.38	0.40	0.40	0.38	0.38	0.40	0.40
Type II cement, lb/yd <sup>3</sup>	420	469	469	559	507	551	551
Class F fly ash, lb/yd <sup>3</sup>	180	156	156	240	218	184	184
Total cementitious, lb/yd <sup>3</sup>	600	625	625	799	725	735	735
3/4 in. coarse aggregate, lb/yd <sup>3</sup>	1399	1368	1368	1337	1349	1352	1352
3/8 in. coarse aggregate, lb/yd <sup>3</sup>	463	453	453	352	370	391	391
Fine aggregate, lb/yd <sup>3</sup>	1216	1189	1216	1014	1123	1047	1047
Total water, lb/yd <sup>3</sup>	230	250	250	302	275	295	295
Air-entraining admixture	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
High-range water-reducing admixture	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Shrinkage-reducing admixture	—	—	✓	—	—	—	✓
Entrained-air content, %	6.2	6.0	7.0	5.0	7.5	5.4	6.2
Slump, in.	6.25	5.00	5.25	6.25	6.00	7.00	6.00
Unit weight, lb/ft <sup>3</sup>	144.64	144.48	142.64	145.28	140.80	144.64	143.60
28-day compressive strength, psi	7228	7189	6439	7552	7361	7205	6574
56-day compressive strength, psi	8294	7747	7206	8508	8075	7985	7473

<sup>7</sup>Lehigh NW Cement Company

Note: 1 lb/yd<sup>3</sup> = 0.6 kg/m<sup>3</sup>; 1 in. = 25 mm; 1 lb/ft<sup>3</sup> = 16 kg/m<sup>3</sup>; 1 psi = 0.007 MPa

**Table 1(b):**  
**Second group of concrete mixtures with PLC and Class F fly ash (FA)**

Materials or properties	Mixtures					
	9A with 30% FA	9B with 25% FA	9C with 25% FA	10A with 30% FA	10B with 25% FA	10C with 25% FA
<i>w/cm</i>	0.38	0.40	0.40	0.38	0.40	0.40
Type II cement, lb/yd <sup>3</sup>	455	529	529	420	469	469
Class F fly ash, lb/yd <sup>3</sup>	195	176	176	180	156	156
Total cementitious, lb/yd <sup>3</sup>	650	705	705	600	625	625
3/4 in. coarse aggregate, lb/yd <sup>3</sup>	1359	1327	1327	0	0	0
3/8 in. coarse aggregate, lb/yd <sup>3</sup>	450	401	401	1670	1660	1660
Fine aggregate, lb/yd <sup>3</sup>	1181	1129	1129	1401	1338	1338
Total water, lb/yd <sup>3</sup>	246	280	280	228	250	250
Air-entraining admixture	✓	✓	✓	✓	✓	✓
High-range water-reducing admixture	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Shrinkage-reducing admixture	—	—	✓	—	—	✓
Entrained-air content, %	6.0	5.5	6.0	7.5	7.4	5.8
Slump, in.	6.00	6.75	6.50	4.00	3.50	3.50
Unit weight, lb/ft <sup>3</sup>	144.88	143.52	143.36	142.00	142.08	144.80
28-day compressive strength, psi	7238	6992	6529	6993	7995	8091
56-day compressive strength, psi	7668	7686	7236	8005	8836	8995

<sup>7</sup>Lehigh NW Cement Company

Note: 1 lb/yd<sup>3</sup> = 0.6 kg/m<sup>3</sup>; 1 in. = 25 mm; 1 lb/ft<sup>3</sup> = 16 kg/m<sup>3</sup>; 1 psi = 0.007 MPa

**Table 2:**  
Concrete mixtures with Type I/II cement and Class F fly ash (FA)

Materials or properties	Mixtures	
	4G with 30% FA	4I with 25% FA
<i>w/cm</i>	0.38	0.40
Type I/II cement, lb/yd <sup>3</sup>	507	551
Class F fly ash, lb/yd <sup>3</sup>	218	184
Total cementitious, lb/yd <sup>3</sup>	725	735
3/4 in. coarse aggregate, lb/yd <sup>3</sup>	1349	1352
3/8 in. coarse aggregate, lb/yd <sup>3</sup>	370	391
Fine aggregate, lb/yd <sup>3</sup>	1123	1047
Total water, lb/yd <sup>3</sup>	275	295
Air-entraining admixture	✓	✓
High-range water-reducing admixture	✓	✓
Shrinkage-reducing admixture	—	✓
Entrained air content, %	6.6	5.6
Slump, in.	6.00	6.50
Unit weight, lb/ft <sup>3</sup>	142.32	142.88
28-day compressive strength, psi	7087	6548
56-day compressive strength, psi	7872	7515

Note: 1 lb/yd<sup>3</sup> = 0.6 kg/m<sup>3</sup>; 1 in. = 25 mm; 1 lb/ft<sup>3</sup> = 16 kg/m<sup>3</sup>; 1 psi = 0.007 MPa

values at a reference time for comparison purposes. The  $D_a$  calculated by fitting the ASTM C1556 results to the well-known solution of Fick's Second Law is the average of the changing diffusion coefficient over the test period. To make this conversion, one first needs to determine the time at which  $D_a$  occurs, which can be done using Eq. (1).<sup>10</sup> Then, Eq. (2) is used to calculate the diffusion coefficients at the reference time. In this study, a reference time of 28 days was used, as in the most common service-life prediction models.

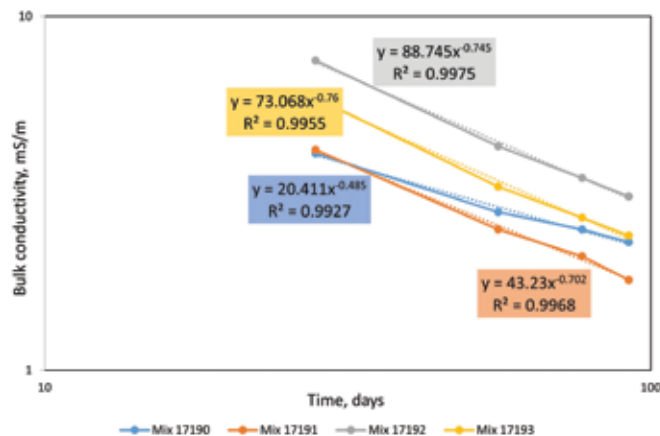
$$t_{eff} = \left[ \frac{(1-m)(t_2 - t_1)}{t_2^{1-m} - t_1^{1-m}} \right]^{1/m} \quad m \neq 0.1 \quad (1)$$

$$D_{28} = \frac{D_a}{\left( \frac{28}{t_{eff}} \right)^m} \quad (2)$$

where  $t_{eff}$  is the effective time in days at which the  $D_a$  occurs;  $m$  is the aging factor;  $t_1$  is the age of the concrete at the start of the exposure;  $t_2$  is the age of the concrete at the end of the exposure; and  $D_{28}$  is the 28-day diffusion coefficient.

Aging factors were determined by plotting bulk conductivity results at various ages obtained from ASTM C1760<sup>11</sup> on a log-log scale and fitting a power function. Figure 1 shows the test results for various concrete mixtures; the negative slopes correspond to aging factors. The following sections provide the conductivity and calculated  $m$  values for the tested concrete mixtures.

ASTM C457/C457M<sup>12</sup> hardened concrete air void analysis was performed to estimate freezing-and-thawing resistance.



**Fig. 1:** Example bulk conductivity results versus time, plotted on a log-log scale. Aging factors are defined by the slopes (the power terms) for the fitted functions

If spacing factors were above 0.008 in. (0.2 mm), then ASTM C666/C666M, Procedure A,<sup>13</sup> was performed.

## Concrete Permeability and Bulk Diffusion Results

### PLC and Class F fly ash mixtures

The RCPT results are shown in Fig. 2. They are for normal-temperature curing and accelerated curing (7 days at normal curing followed by 21 days moist curing at 100°F [38°C]), which is used for concrete mixtures containing SCMs.

The RCPT results for accelerated-curing PLC concrete mixtures were near or below 1500 coulombs in most cases, with the best performers in general being at a water-cementitious materials ratio (*w/cm*) of 0.38 with 30% Class F fly ash replacement.

The bulk conductivity results are shown in Fig. 3. As this is a nondestructive test, the same concrete cylinders can be tested multiple times, reducing variability. In all cases, there was a significant decrease in conductivity between 28 and 56 days. The 28-day conductivity values show less variation than the rapid chloride permeability values as the concrete does not heat up in the ASTM C1760 test method, which causes the current to rise in time in the RCPT.<sup>15</sup>

The data shown in Fig. 3 were used to calculate the  $m$  value, which relates to the reduction in concrete permeability with time. These values were used, as noted earlier, to convert the ASTM C1556 bulk diffusion coefficients from an average value determined over the course of the test to the value at 28 days.  $D_{28}$  and  $m$  values were then used to predict chloride ingress into concrete in conjunction with the exposure conditions. Figure 4 shows  $D_{28}$  and  $m$  values for the tested PLC and fly ash concretes.

The 28-day diffusion coefficients for concrete mixtures with PLC and fly ash in Fig. 4 were lower than those predicted in Life-365<sup>TM</sup> for concrete mixtures with portland cement and fly ash.<sup>15</sup>

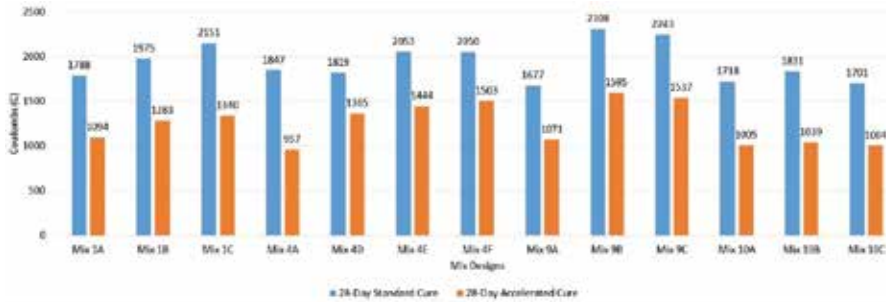


Fig. 2: ASTM C1202 RCPT results for PLC concretes containing Class F fly ash

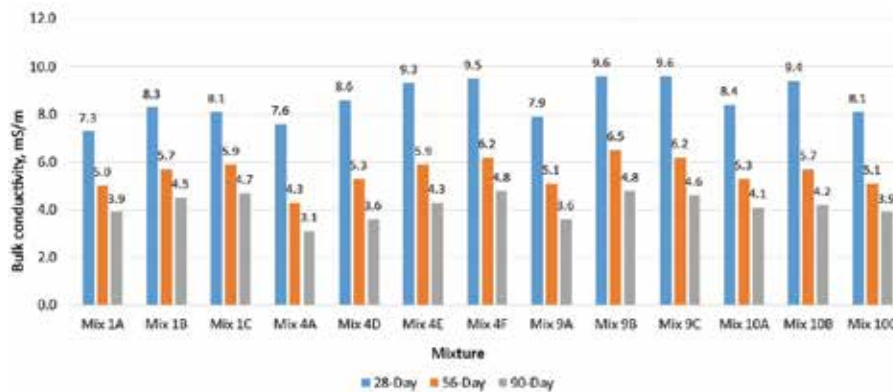


Fig. 3: ASTM C1760 bulk conductivity results over time for PLC concrete mixtures containing Class F fly ash

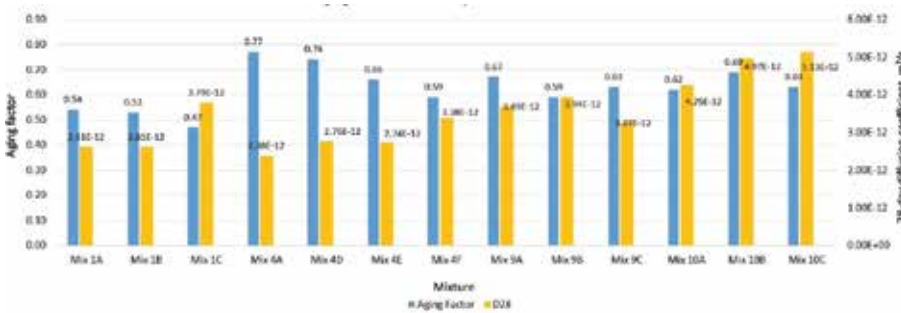


Fig. 4: Aging factors and 28-day diffusion coefficients for concrete mixtures containing PLC and Class F fly ash

### Comparison of PLC and Type I/II cement mixtures

Two of the mixtures with PLC and Class F fly ash were compared to two mixtures with Type I/II portland cement and Class F fly ash. Figure 5 shows the RCPT for these mixtures; Fig. 6 shows the bulk conductivities; and Fig. 7 shows the diffusion coefficients and aging factors.

The RCP (normal cure), bulk conductivity, and diffusion coefficient values for the PLC concrete specimens were all lower than those of the Type I/II concrete specimens, indicating that PLC improves resistance to chloride penetration. The RCP (accelerated cure) appeared to have been more effective with the Type I/II concrete specimens as those specimens had a lower RCP value.

### Air Entrainment and Freezing-and-Thawing Results PLC and fly ash mixtures

Figure 8 shows the plastic air, hardened air, and spacing factor data for the PLC concrete specimens containing Class F fly ash. All concretes had good air systems, as can be seen in Fig. 8. Specimens from Mixture 10C were tested for ASTM C666/C666M, Procedure A, because the spacing factor was at the upper specified limit. The relative dynamic modulus of elasticity (RDME) factor at 300 cycles was 96.5%, indicating good concrete durability against freezing and thawing.

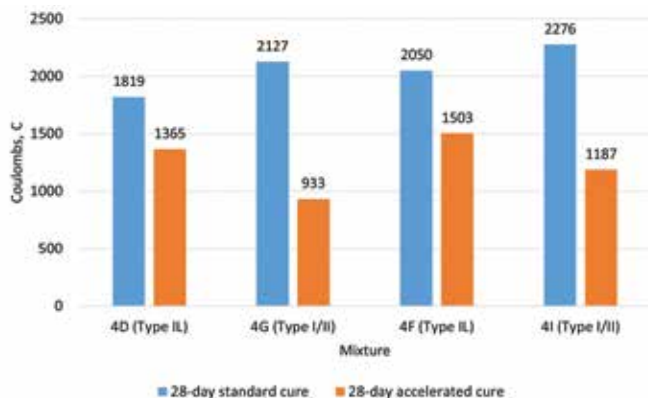


Fig. 5: Comparison of RCP results for PLC (Type IL) and Type I/II concretes containing Class F fly ash

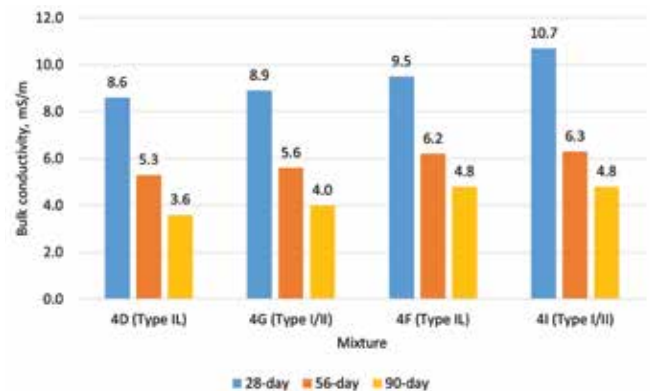


Fig. 6: Comparison of bulk conductivity results for PLC (Type IL) and Type I/II concretes containing Class F fly ash

## Comparison of PLC and Type I/II concretes with fly ash

The air-void data comparisons between the PLC with Class F fly ash concretes and Type I/II portland cement with Class F fly ash concretes are shown in Fig. 9. The spacing factors were identical, and the air contents were similar.

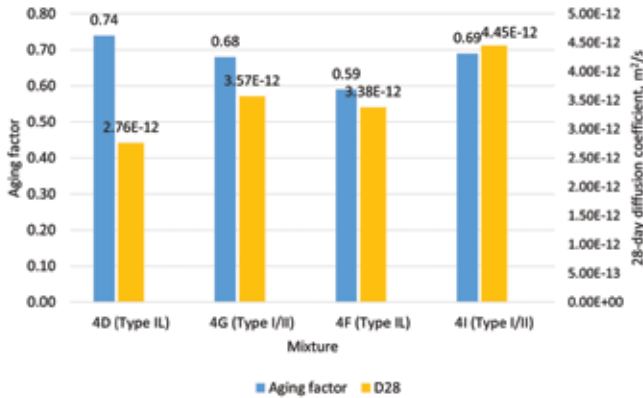


Fig. 7: Comparison of aging factor and 28-day diffusion coefficient values for PLC (Type IL) and Type I/II concretes containing Class F fly ash

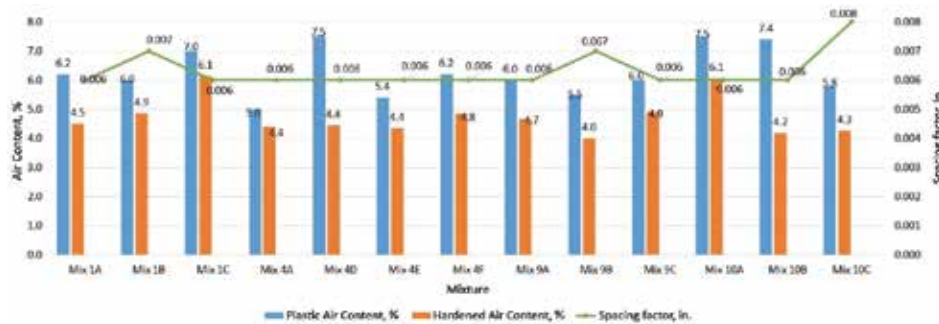


Fig. 8: Air-entrainment parameters for PLC concretes containing Class F fly ash

## Conclusions

Concrete mixtures containing ASTM Type IL PLC and ASTM Class F fly ash were proposed for a large light-rail infrastructure project in the Pacific Northwest. The test program described in this article showed that the PLC concrete mixtures met the project’s concrete durability plan’s specific 100-year service-life parameters.

Limited tests of concrete containing PLC and slag cement (not presented in this article) indicated that this mixture also would have met the project’s durability plan and 100-year service-life parameters.

Additional tests showed that the PLC concretes had lower permeability to chloride ingress than concretes produced with Type I/II OPC and that air entrainment was comparable between the two.

Based on the concrete testing performed, PLC concrete with Class F fly ash can provide better performance related to chloride ingress than Type I/II OPC concrete with Class F fly ash.

## Acknowledgments

The authors wish to thank Lehigh NW Cement Company, Kiewit Construction, and Corliss Resources, Inc., for making this study possible.

## References

1. ASTM C595/C595M-20, “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 10 pp.
2. Thomas, M.D.A.; Delagrave, A.; Blair, B.; and Barcelo, L., “Equivalent Durability Performance of Portland Limestone Cement,” *Concrete International*, V. 35, No. 12, 2013, pp. 39-45.

# NEW and UPDATED ACI Specifications



## Specifications for Concrete Construction

ACI’s 301-20 is a specification that architects and engineers can apply to any construction project involving structural concrete.

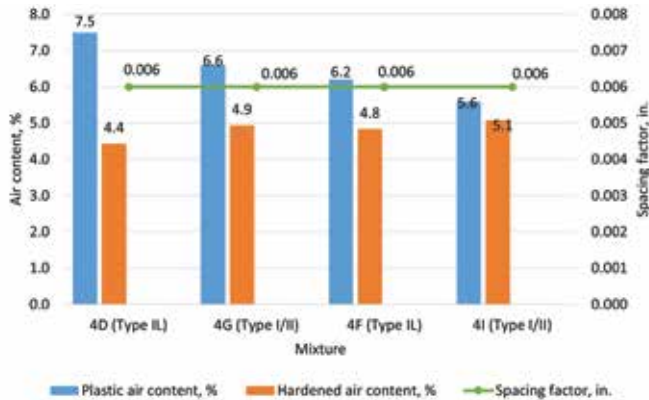
## Field Reference Manual

ACI’s *Field Reference Manual* is a compilation of ACI 301-20, “Specifications for Structural Concrete,” and additional ACI documents.



Order at [www.concrete.org](http://www.concrete.org) or call us at +1.248.848.3800





**Fig. 9: Air-void system comparison of PLC (Type II) and Type I/II concretes with Class F fly ash**

3. ASTM C618-19, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 5 pp.
4. ASTM C150/C150M-21, “Standard Specification for Portland Cement,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, 9 pp.
5. ASTM C33/C33M-18, “Standard Specification for Concrete Aggregates,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 8 pp.
6. ASTM C494/C494M-19, “Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 15 pp.
7. ASTM C1012/C1012M-18B, “Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 9 pp.
8. ASTM C1556-11A, “Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 7 pp.
9. ASTM C1202-19, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 8 pp.
10. Stanish, K., and Thomas, M., “The Use of Bulk Diffusion Tests to Establish Time-Dependent Chloride Diffusion Coefficients,” *Cement and Concrete Research*, V. 33, No. 1, 2003, pp. 55-62.
11. ASTM C1760-12, “Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete (Withdrawn 2021),” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, 5 pp.
12. ASTM C457/C457M-16, “Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 18 pp.
13. ASTM C666/C666M-15, “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, 7 pp.
14. Hope, B.B.; Ip, A.K.; and Manning, D.G., “Corrosion and Electrical Impedance in Concrete,” *Cement and Concrete Research*, V. 15, No. 3, 1985, pp. 523-534.
15. Ehlen, M.A., and Kojundic, A.N., “Life-365™ v2.2,” *Concrete International*, V. 36, No. 5, May 2014, pp. 41-44.

Selected for reader interest by the editors.



**Neal S. Berke, FACI**, is Vice President of Research at Tourney Consulting Group, LLC, in Kalamazoo, MI, USA. He has extensive experience in the development and application of concrete admixtures and materials as well as corrosion and durability of concrete. He is a member of ACI Committees 212, Chemical Admixtures; 222, Corrosion of Metals in Concrete; 224, Cracking; and 365, Service Life Prediction. He received the 2012 ACI Jean-Claude Roumain Innovation in Concrete Award. He received his PhD from the University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.



ACI member **Ali N. Inceefe** is a civil engineer with Tourney Consulting Group. He is a member of ACI Committee 365, Service Life Prediction. He received his MS in structural engineering from Western Michigan University, Kalamazoo, MI, USA.



**Allan Kramer** is the Technical Service Manager for the Lehigh NW Cement Company in Seattle, WA, USA. He has over 40 years of extensive concrete and cement industry experience. His expertise includes forensic investigation, analysis, and resolution of hardened concrete problems, and developing high-performance and high-strength concrete mixtures for the Seattle and Puget Sound region of Washington State. He received his BS in industrial engineering from Fairleigh Dickinson University, Teaneck, NJ, USA, and is a National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) Certified Concrete Technologist – Level 4.



**Oscar R. Antommattei, FACI**, is Chief Concrete Engineer and Engineering Manager with Kiewit Engineering Group Inc., Lone Tree, CO, USA. He has 20 years of industry experience in concrete materials with focuses that range from technical support to infrastructure design and heavy-civil construction projects. His technical interests are performance-based concrete, long-term durability, constructability, and mass concrete. He is Chair of the ACI Construction Liaison Committee, and a member of ACI Committees 134, Concrete Constructability; 201, Durability of Concrete; 207, Mass and Thermally Controlled Concrete; 305, Hot Weather Concreting; 308, Curing Concrete; and 321, Concrete Durability Code; and a member of ACI Subcommittee 301-H, Mass Concrete—Section 8.

# Durabilidad de concreto con cemento calizo de portland

*Probando mezclas para un proyecto de infraestructura*

*por Neal S. Berke, Ali N. Inceefe, Allan Kramer, y Oscar R. Antommattei*

La industria del cemento en Norte América se está comprometiendo con reducir el impacto ambiental del cemento a través de las siguientes maneras: Incremento en el uso de combustibles alternativos, materiales cementantes suplementarios (MCS), la adición de piedra caliza para la producción de cemento combinado la iniciación de tecnologías de captura de carbono, y la contabilización de recarbonación del concreto endurecido. Estas prácticas y tecnologías sustentables, reducirán la huella de emisión de carbono del concreto. Reducir la huella de carbono a largo plazo se puede obtener incrementando la durabilidad de las estructuras de concreto, de tal modo que no requieran reparaciones o reemplazos con tanta frecuencia. El Cemento Portland Calizo (CPC) se está convirtiendo rápidamente en el cemento mayormente usado en América del Norte. El CPC está incluido en el estándar ASTM C595/C595M<sup>1</sup> como Tipo IL, el cual permite reemplazar de un 5% a 15% del Clinker con una mezcla de roca caliza y Clinker. Esto resulta en una reducción de la huella de carbono del cemento, sin afectar el desempeño del concreto que usa este CPC.

Estudios recientes muestran que el concreto hecho con CPC tiene buena resistencia a los sulfatos y a la reactividad álcali-agregado.<sup>2</sup> En este artículo, mostraremos información adicional de un proyecto de infraestructura en el uso de concreto CPC y sus propiedades de durabilidad, tales como la resistencia al congelamiento y descongelamiento, y la penetración de iones de cloruro, para una vida útil más extensa.

Para un proyecto de infraestructura ferroviaria ligera en la región noroeste de los Estados Unidos, se propuso cambiar el concreto con cemento portland ordinario (CPO) a CPC. Este proyecto tenía como meta de diseño una duración de vida útil del concreto de 100 años. Por esta razón, se hizo de suma importancia documentar el alcance de vida útil del concreto bajo los requisitos de las especificaciones de CPC, y que él mismo fuera exitoso.

El trabajo descrito más adelante muestra que la buena durabilidad de un concreto con 100 años de vida útil es alcanzable utilizando CPC con Ceniza Volante Clase F como MCS. Buenos resultados (no incluidos) de durabilidad fueron obtenidos en algunos experimentos con CPC y cemento escoria granulada de alto horno. Por otro lado, como el cemento de escoria no estaba disponible para ser utilizado en el proyecto, el estudio se concentró en el uso de Ceniza Volante Clase F como MCS.

## Trabajo Experimental

### Materiales

De acuerdo con el ASTM C595/C595M, el CPC utilizado en este estudio cumple con los requisitos para un cemento combinado Tipo IL. La Ceniza Volante utilizada en este estudio cumple con los requerimientos de una ceniza volante Clase F según el ASTM C618.<sup>3</sup>

El CPO utilizado en este estudio cumple con el ASTM C150/C150M<sup>4</sup> para un cemento Tipo I/II. Los agregados y aditivos utilizados en este estudio cumplen con los requisitos del ASTM C33/C33M<sup>5</sup> y el ASTM C494/C494M<sup>6</sup>, respectivamente. El concreto utilizado para las pruebas fue producido por una gran mezcladora de laboratorio en Corliss Resources, Inc., el cual está localizado en Sumner, WA, USA. Los especímenes cilíndricos de concreto para las pruebas de durabilidad fueron enviados húmedos en cajas térmicamente aisladas al laboratorio de Tourney Consulting Group en Kalamazoo, MI, USA.

Las proporciones de la mezcla de concreto, sus propiedades plásticas y resistencias a la compresión se muestran en las tablas CPC y en la Tabla 2 las mezclas con cemento Tipo I/II.

## Pruebas de durabilidad

El CPC se utilizaría en varios elementos del proyecto del tren ligero. El diseño de las mezclas se basó en la exposición a cloruros, el recubrimiento del concreto sobre el acero de refuerzo y condiciones de congelación y descongelación para los elementos específicos. Los agregados utilizados no fueron susceptibles a la reacción alcalina-sílice (ASR), y la exposición a sulfato fue baja, por lo que las pruebas de resistencia a este tipo de degradación no fueron realizadas. En pruebas realizadas por el productor de cemento, el CPC utilizado tuvo buena resistencia a sulfatos en acorde con el ASTM C1012/C1012M.<sup>7</sup>

La principal preocupación fue el ingreso de cloruros al concreto que pudiera causar corrosión del acero de refuerzo que pudiese causar grietas y rupturas o descascaramiento del concreto. Se realizaron pruebas de difusión en acorde al ASTM C1556<sup>8</sup> para determinar la susceptibilidad del ingreso de cloruros. Para propósitos de calidad, en acorde al ASTM C1202<sup>9</sup>, se realizó una prueba rápida de permeabilidad de cloruro (PRPC), dada la corta duración de la prueba.

**Tabla 1a:**  
**Primer grupo de mezclas de concreto con CPC y Ceniza Volante Clase F**

Propiedades o Materiales	Mezclas						
	1A con 30% CV	1B con 25% CV	1C con 25% CV	4A con 30% CV	4D con 30% CV	4E con 30% CV	4F con 25% CV
<i>a/mc</i>	0.38	0.40	0.40	0.38	0.38	0.40	0.40
Cemento Tipo IL, * lb/yd <sup>3</sup>	420	469	469	559	507	551	551
Ceniza Volante Clase F, lb/yd <sup>3</sup>	180	156	156	240	218	184	184
Cementicio total, lb/yd <sup>3</sup>	600	625	625	799	725	735	735
Agregado Grueso 3/4 in., lb/yd <sup>3</sup>	1399	1368	1368	1337	1349	1352	1352
Agregado Grueso 3/8 in., lb/yd <sup>3</sup>	463	453	453	352	370	391	391
Agregado Fino, lb/yd <sup>3</sup>	1216	1189	1216	1014	1123	1047	1047
Agua Total, lb/yd <sup>3</sup>	230	250	250	302	275	295	295
Aditivo para Aire Incorporado	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aditivo Reductor de Agua de Alto Rango	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aditivo Reductor de la Contracción	-	-	-	-	-	-	✓
Contenido de Aire Incorporado, %	6.2	6.0	7.0	5.0	7.5	5.4	6.2
Asentamiento, in.	6.25	5.00	5.25	6.25	6.00	7.00	6.00
Peso Unitario, lb/ft <sup>3</sup>	144.64	144.48	142.64	145.28	140.80	144.64	143.60
Resistencia a la Compresión a 28 días, psi	7228	7189	6439	7552	7361	7205	6574
Resistencia a la Compresión a 56 días, psi	8294	7747	7206	8508	8075	7985	7473

\*Lehigh NW Cement Company

Nota: 1 lb/yd<sup>3</sup> = 0.6 kg/m<sup>3</sup>; 1 in. = 25mm, 1 lb/ft<sup>3</sup> = 16kg/m<sup>3</sup>; 1 psi=0.007 MPa



**Tabla 1b:**  
**Segundo grupo de mezclas de concreto con CPC y Ceniza Volante Clase F**

Propiedades o Materiales	Mezclas					
	9A con 30%CV	9B con 25%CV	9C con 25% CV	10A con 30% CV	10B con 30% CV	10C con 30% CV
<i>a/mc</i>	0.38	0.40	0.40	0.38	0.40	0.40
Cemento Tipo IL,* lb/yd <sup>3</sup>	455	529	529	420	469	469
Ceniza Volante Clase F, lb/yd <sup>3</sup>	195	176	176	180	156	156
Cementicio total, lb/yd <sup>3</sup>	650	705	705	600	625	625
Agregado Grueso 3/4 in., lb/yd <sup>3</sup>	1359	1327	1327	0	0	0
Agregado Grueso 3/8 in., lb/yd <sup>3</sup>	450	401	401	1670	1660	1660
Agregado Fino, lb/yd <sup>3</sup>	1181	1129	1129	1401	1338	1338
Agua Total, lb/yd <sup>3</sup>	246	280	280	228	250	250
Aditivo para Aire Incorporado	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aditivo Reductor de Agua de Alto Rango	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aditivo Reductor de la Contracción	-	-	-	-	-	✓
Contenido de Aire Incorporado, %	6.0	5.5	6.0	7.5	7.4	5.8
Asentamiento, in.	6.00	6.75	6.50	4.00	3.50	3.50
Peso Unitario, lb/ft <sup>3</sup>	144.88	143.52	143.36	142.00	142.08	144.80
Resistencia a la Compresión a 28 días, psi	7238	6992	6529	6993	7995	8091
Resistencia a la Compresión a 56 días, psi	7668	7686	7236	8005	8836	8995

\*Lehigh NW Cement Company  
Nota: 1 lb/yd<sup>3</sup> = 0.6 kg/m<sup>3</sup>; 1 in. = 25mm, 1 lb/ft<sup>3</sup> = 16kg/m<sup>3</sup>; 1 psi=0.007 MPa

**Tabla 2:**  
**Mezclas de concreto con cemento Tipo I/II y Ceniza Volante Clase F**

Propiedades o Materiales	Mezclas	
	4G con 30% CV	4I con 25% CV
<i>a/mc</i>	0.38	0.40
Cemento Tipo IL,* lb/yd <sup>3</sup>	507	551
Ceniza Volante Clase F, lb/yd <sup>3</sup>	218	184
Cementicio total, lb/yd <sup>3</sup>	725	735
Agregado Grueso 3/4 in., lb/yd <sup>3</sup>	1349	1352
Agregado Grueso 3/8 in., lb/yd <sup>3</sup>	370	391
Agregado Fino, lb/yd <sup>3</sup>	1123	1047
Agua Total, lb/yd <sup>3</sup>	275	295
Aditivo para Aire Incorporado	✓	✓
Aditivo de Reductor de Agua de Alto Rango	✓	✓
Aditivo Reductor de la Contracción	-	✓
Contenido de Aire Incorporado, %	6.6	5.6
Asentamiento, in.	6.00	6.50
Peso Unitario, lb/ft <sup>3</sup>	142.32	142.88
Resistencia a la Compresión a 28 días, psi	7087	6548
Resistencia a la Compresión a 56 días, psi	7872	7515

\*Lehigh NW Cement Company  
Nota: 1 lb/yd<sup>3</sup> = 0.6 kg/m<sup>3</sup>; 1 in. = 25mm, 1 lb/ft<sup>3</sup> = 16kg/m<sup>3</sup>; 1 psi=0.007 MPa

Las pruebas del coeficiente de difusión fueron realizadas en muestras de concreto con 28 días de curado húmedo. En estas pruebas, la edad de las muestras de concreto al comienzo de la exposición variaba entre sí por varios días; por lo tanto, el valor de coeficiente de difusión aparente ( $D_a$ ) tuvo que ser convertido a un valor de coeficientes de difusión con tiempos de referencia para fines de comparación. Utilizando la conocida Segunda Ley de Fick y superponiendo el ASTM C1556 para calcular el  $D_a$  resulta en el promedio del coeficiente de difusión variable durante un periodo de tiempo. Para hacer esta conversión, se necesita determinar a que tiempo ocurre  $D_a$ , el cual se puede obtener utilizando la ecuación (1)<sup>10</sup>. Luego, la ecuación (2) es utilizada para calcular el coeficiente de difusión en el tiempo de referencia. Para este estudio, se utilizó como referencia un tiempo de 28 días, tal como se utiliza comúnmente en los modelos de predicción de vida útil.

$$t_{eff} = \left[ \frac{(1-m)(t_2 - t_1)}{t_2^{1-m} - t_1^{1-m}} \right]^{1/m} \quad m \neq 0.1 \quad (1)$$

$$D_{28} = \frac{D_a}{\left( \frac{28}{t_{eff}} \right)^m} \quad (2)$$

Donde  $t_{eff}$  es el tiempo efectivo en días en donde ocurre  $D_a$ ;  $m$  es el factor de [tiempo transcurrido] [envejecimiento][edad];  $t_1$  es la edad del concreto al momento de comenzar la exposición;  $t_2$  es la edad del concreto al momento final de exposición; y  $D_{28}$  es el coeficiente de difusión a los 28 días.

Los factores de envejecimiento fueron determinados graficando resultados de conductividad a edades variables, obtenidos del ASTM C1760<sup>11</sup> con una gráfica logarítmica y superpuesta con una función de exponencial. La figura 1 muestra los resultados de las pruebas para las diferentes mezclas de concreto; donde las pendientes negativas representan los factores de envejecimiento. Las siguientes secciones proveen los valores calculados de conductividad y los valores  $m$  para las pruebas realizadas en las mezclas de concreto.

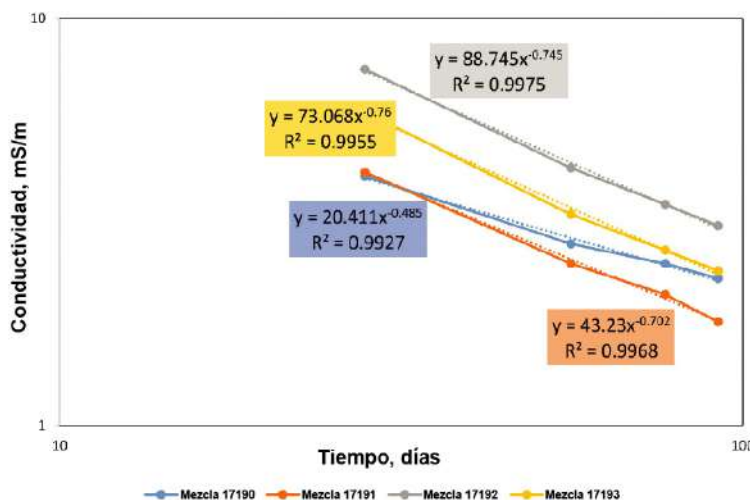


Figura 1: Ejemplo de valores de conductividad versus tiempo, graficada de manera logarítmica. Los factores de tiempo (envejecimiento) están definidos por las pendientes (términos de potencia) de las funciones.

Para determinar la resistencia a congelamiento y descongelamiento se realizó un análisis de vacíos de aire en el concreto endurecido de acuerdo con el ASTM C457/C457M.<sup>12</sup> Si los factores de espacios resultaban mayores a 0.008 in. (0.2 mm), entonces se realizaba el análisis del Proceso A<sup>13</sup>, del ASTM C666/C666M.

## Resultados de Permeabilidad y Difusión del Concreto

### Mezclas con CPC y Ceniza Volante Clase F

Los resultados de PRPC se muestran en la figura 2. Estos resultados son para mezclas de concretos que contienen MCS, en curados a temperatura normal y curados acelerados (7 días de curado normal y los siguientes 21 días, curado húmedo a 100°F [38°C]).

Los resultados del PRPC para el curado acelerado del concreto CPC estaban por debajo o cerca de los 1500 coulombs en la mayoría de los casos. Los resultados con mayor rendimiento fueron aquellos con una relación agua - material cementante (a/mc) de 0.38 y con un reemplazo del 30% de Ceniza Volante Clase F.

Los resultados de conductividad son presentados en la figura 3. Las pruebas realizadas son no-destructivas, por lo que se pueden utilizar los cilindros de concreto varias veces, reduciendo la variabilidad. En todos los casos, se mostró una reducción significativa de conductividad entre los 28 y 56 días. Los valores de conductividad a los 28 días muestran menor variación que los que se muestran en la prueba de rápida de permeabilidad de cloruro, ya que en la prueba de ASTM C1760 no se calienta las muestras de concreto y por consecuente en el RCPT<sup>14</sup> la corriente incrementa con el tiempo.

Los datos mostrados en la figura 3 fueron utilizados para calcular el valor  $m$ , el cual relaciona la reducción de permeabilidad del concreto con el tiempo. Tal como se mencionó anteriormente, estos valores fueron utilizados para convertir el valor promedio de coeficiente de difusión del ASTM C1556 a uno específico a 28 días. Los valores  $D_{28}$  y  $m$  fueron utilizados para predecir el ingreso de cloruros en el concreto en conjunción con las condiciones de exposición. La figura 4 muestra los valores  $D_{28}$  y  $m$  para los concretos probados con CPC y Ceniza Volante.

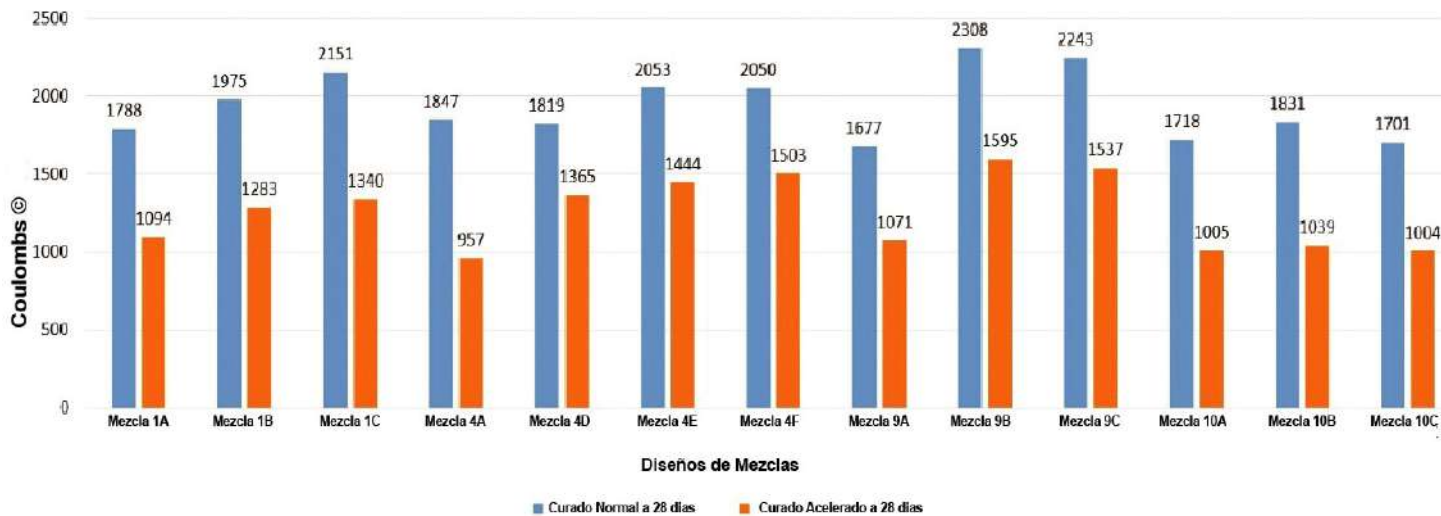


Figura 2: Resultados de RCPT de acuerdo al ASTM C1202 para concretos CPC que contienen Ceniza Volante Clase F

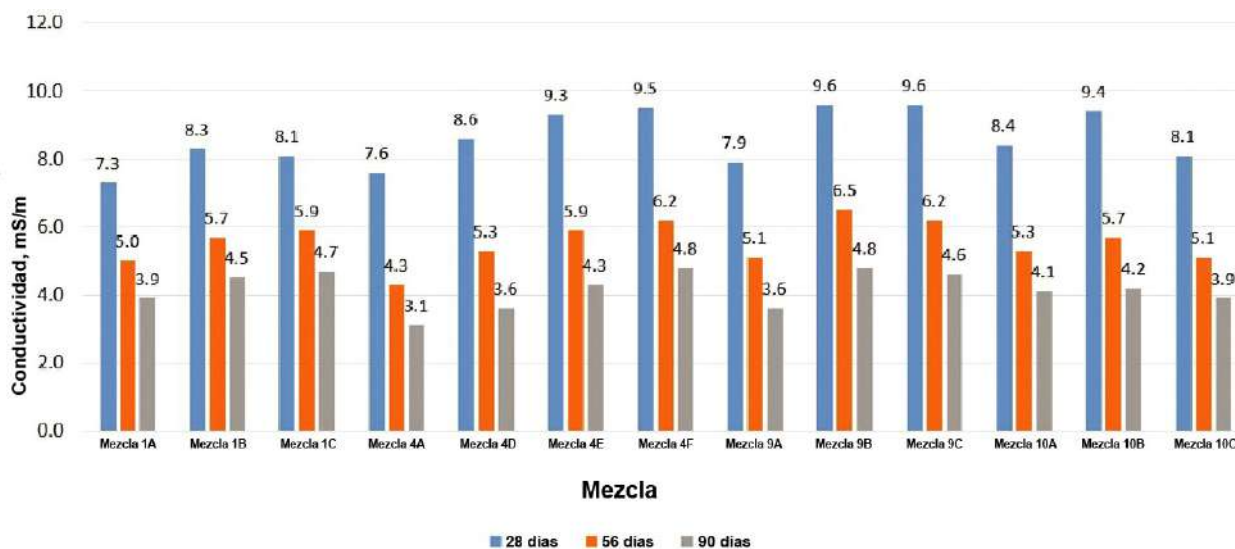


Figura 3: De acuerdo al ASTM C1760 los resultados a largo plazo de conductividad para mezclas de concreto con CPC y Ceniza Volante Clase F

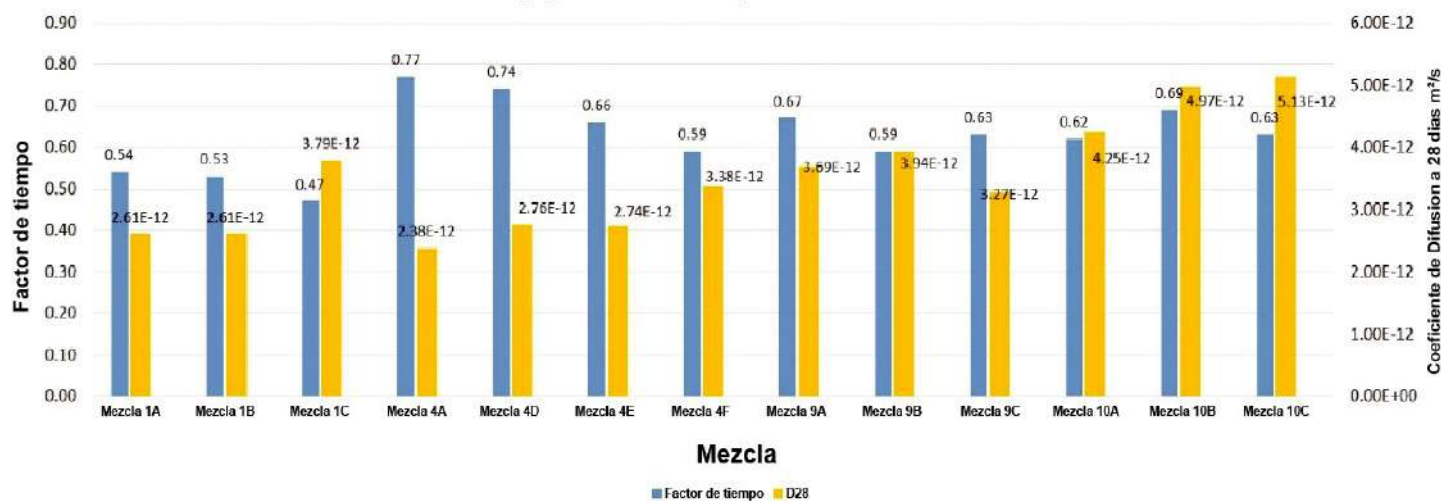


Figura 4: Factores de tiempo (envejecimiento) y coeficientes de difusión a 28 días para mezclas de concreto que contienen CPC y Ceniza Volante Clase F

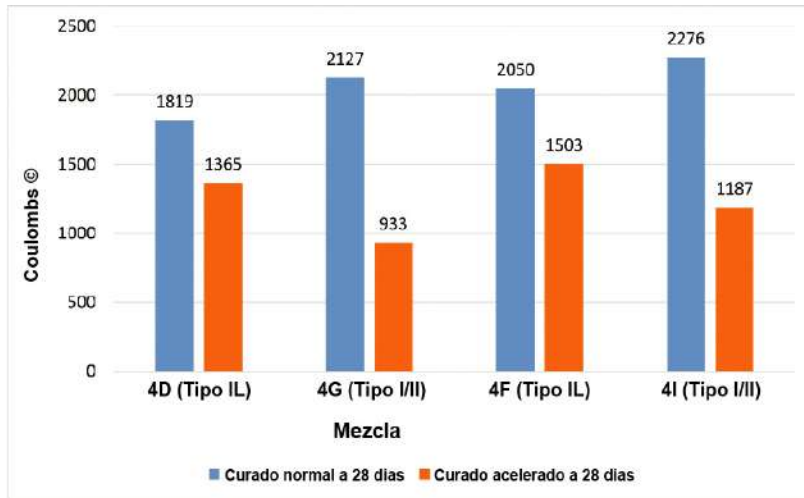


Figura 5: Comparación de resultados PRPC para concretos que contienen CPC (Tipo IL) y Tipo I/II con Ceniza Volante Clase F

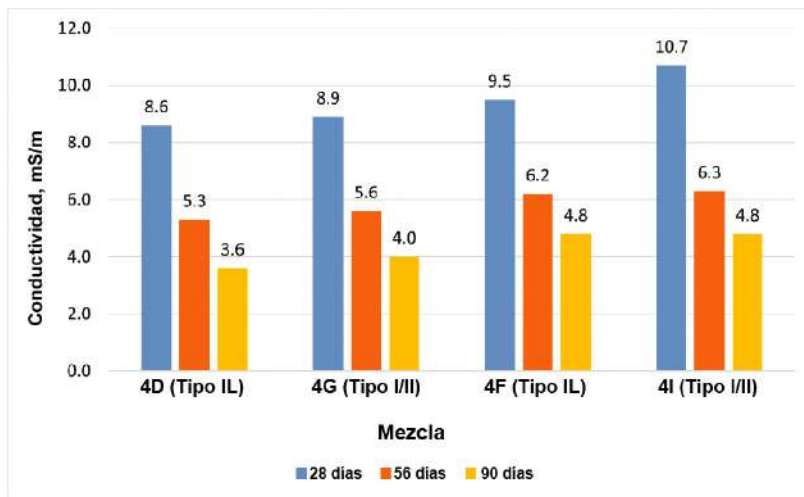


Figura 6: Comparación de resultados de conductividad para concretos con CPC (Tipo IL) y Tipo I/II que contiene Ceniza Volante Clase F

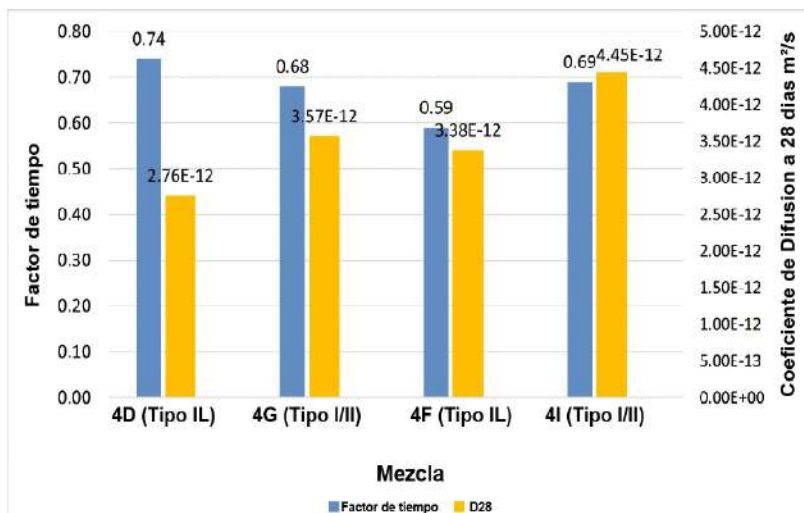


Figura 7: Comparación de factores de tiempo (envejecimiento) y valores de coeficientes de difusión a 28 días para concretos con CCP (Tipo IL) y Tipo I/II con Ceniza Volante Clase F

Los valores del coeficiente de difusión de las mezclas de concreto con CPC y Ceniza Volante a los 28 días fueron menores a aquellos de la predicción del Life-365tm para concretos con cemento portland y Ceniza Volante<sup>15</sup>.

## Comparación de mezclas de cemento CPC y Tipo I/II

Dos de las mezclas con CPC y Ceniza Volante Clase F fueron comparados con mezclas con cemento portland Tipo I/II y Ceniza Volante Clase F. La figura 5 muestra el PCPR para las mezclas; la figura 6 muestra la conductividad; la figura 7 muestra los coeficientes de difusión y los factores de tiempo (envejecimiento).

Los valores del PRPC (curado normal), conductividad, y coeficiente de difusión para las muestras de concreto CPC fueron menores a aquellos de Tipo I/II, indicando que el CPC incrementa la resistencia a la penetración de cloruros.

Los valores de PRPC (curado acelerado) parecieron ser más efectivos con el Tipo I/II ya que estos tienen valores menores de PRPC.

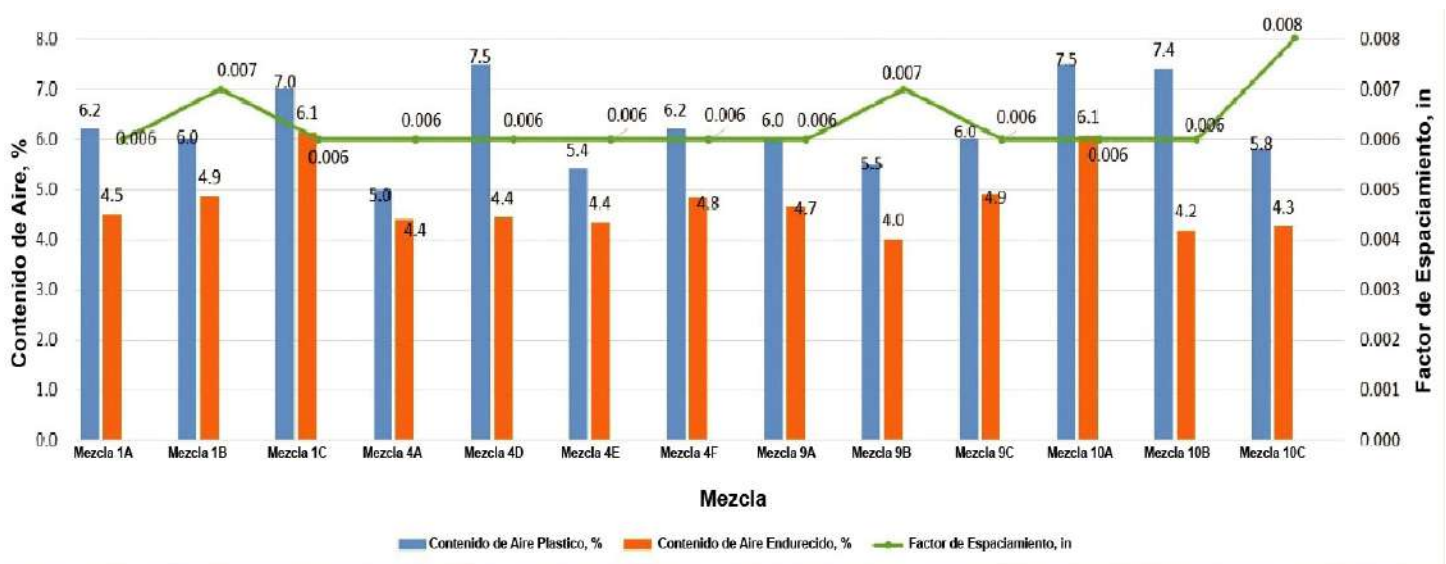


Figura 8: parámetros de contenido de aire para concretos con CPC y Ceniza Volante Clase F

## Resultados de Aire Incorporado y Congelamiento y Descongelamiento

### Mezclas CPC y Ceniza Volante

La figura 8 muestra el aire plástico, aire endurecido, y los factores de espaciamiento para las muestras de CPC que contienen Ceniza Volante Clase F. Todos los concretos tuvieron buenos sistemas de aire, tal como lo muestra la figura 8. Las muestras de la Mezcla 10C fueron probadas bajo el Procedimiento A del ASTM C666/C666M, debido a que el factor de espaciamiento estaba al límite superior especificado. El factor del modulo de elasticidad dinámico relativo (MEDR) a 300 ciclos fue de 96.5% indicando buena durabilidad del concreto contra el congelamiento y descongelamiento.

### Comparación de concretos con CPC y Tipo I/II con Ceniza Volante

Las comparaciones de datos de vacíos de aire entre concretos CPC con Ceniza Volante Clase F y concretos con cemento portland Tipo I/II con Ceniza Volante Clase F son mostrados en la figura 9. Los factores de espacio fueron idénticos y el contenido de aire fue similar.

## Conclusión

Mezclas de concreto con CPC Tipo IL y Ceniza Volante Clase F, ambos en acuerdo al ASTM respectivo, fueron propuestos para un proyecto de infraestructura en el Pacífico Noroeste. Los programas de pruebas descritos en este artículo

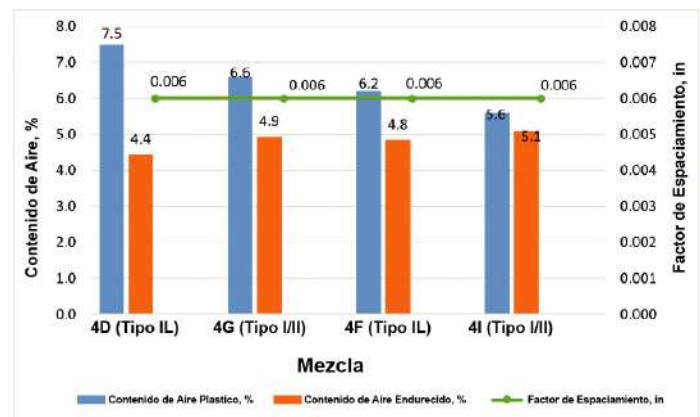


Figura 9: Comparación de los sistemas de vacíos de aire para concretos con CCP (Tipo IL) y Tipo I/II con Ceniza Volante Clase F

mostraron que la mezcla de concreto con CPC alcanzaron a cumplir con los parámetros específicos de durabilidad para 100 años de vida útil.

Pruebas limitadas (no presentadas en este artículo) para concretos con CPC y cemento de escoria indicaron que la mezcla cumpliría con los parámetros de durabilidad de 100 años de vida útil del proyecto.

Pruebas adicionales mostraron que los concreto CPC tuvieron menos permeabilidad de cloruro a diferencia a aquellos producidos con Tipo I/II CPO y que el contenido de aire fue comparable entre los dos.

Basado en las pruebas realizadas al concreto, las mezclas con CPC y Ceniza Volante Clase F pueden proveer mayor rendimiento en prevenir el ingreso de cloruros comparado con aquellos concretos de Tipo I/II CPO y Ceniza Volante Clase F.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a Lehigh NW Cement Company, Kiewit Construction, y Corliss Resources, Inc., por hacer posible este estudio.

## Referencias

1. ASTM C595/C595M-20, "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 10 pp.
2. Thomas, M.D.A.; Delagrave, A.; Blair, B.; and Barcelo, L., "Equivalent Durability Performance of Portland Limestone Cement," Concrete International, V. 35, No. 12, 2013, pp. 39-45.
3. ASTM C618-19, "Standard Specification for Coal Ceniza Volante and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 5 pp.
4. ASTM C150/C150M-21, "Standard Specification for Portland Cement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, 9 pp.
5. ASTM C33/C33M-18, "Standard Specification for Concrete Aggregates," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 8 pp.
6. ASTM C494/C494M-19, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 15 pp.
7. ASTM C1012/C1012M-18B, "Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 9 pp.
8. ASTM C1556-11A, "Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 7 pp.
9. ASTM C1202-19, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 8 pp.

10. Stanish, K., and Thomas, M., "The Use of Bulk Diffusion Tests to Establish Time-Dependent Chloride Diffusion Coefficients," Cement and Concrete Research, V. 33, No. 1, 2003, pp. 55-62.

11. ASTM C1760-12, "Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete (Withdrawn 2021)," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, 5 pp.

12. ASTM C457/C457M-16, "Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 18 pp.

13. ASTM C666/C666M-15, "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, 7 pp.

14. Hope, B.B.; Ip, A.K.; and Manning, D.G., "Corrosion and Electrical Impedance in Concrete," Cement and Concrete Research, V. 15, No. 3, 1985, pp. 523-534.

15. Ehlen, M.A., and Kojundic, A.N., "Life-365™ v2.2," Concrete International, V. 36, No. 5, May 2014, pp. 41-44.



**Neal S. Berke**, FCI es el vicepresidente de Investigación en Tournay Consulting Group, LLC, in Kalamazoo, MI, USA. Tiene amplia experiencia en el Desarrollo y aplicación de aditivos y materiales de concreto, así como la corrosión y durabilidad del concreto. Es miembro de los Comité 212 del ACI, Aditivos Químicos; 222, Corrosión de Metales en Concreto; 224, Agrietamiento; y 365, Predicción de Vida Útil. Recibió el premio ACI Jean-Claude Roumain Innovation in Concrete en 2012. Recibió su doctorado de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.



**Ali N. Inceefe**, miembro del ACI, es un ingeniero civil con Tournay Consulting Group. Es miembro del Comité 365 del ACI, Predicción de Vida Útil. Recibió su maestría en ingeniería estructural de la Universidad de Western Michigan, Kalamazoo, MI, USA



**Allan Kramer**, es el Gerente del Servicio Técnico de Lehigh NW Cement Company en Seattle, WA, USA. Tiene más de 40 años de amplia experiencia en concreto y en la industria del cemento. Su experiencia incluye la investigación forense, análisis y resolución de problemas de concreto endurecido, y el desarrollo de mezclas de concreto de alto rendimiento y alta resistencia para la región de Seattle y Puget Sound del estado de Washington. Recibió su bachillerato en ingeniería industrial de Fairleigh Dickinson University, Teaneck, NJ, USA, y es un tecnólogo certificado en concreto de la Asociación Nacional de Concreto Premezclado (NRMCA) – Nivel 4.



**Oscar R. Antommattei**, FCI, es ingeniero jefe de concreto y gerente de ingeniería de Kiewit Engineering Group Inc., Lone Tree, CO, EE. UU. Tiene 20 años de experiencia en la industria de materiales de concreto con enfoques que van desde el soporte técnico hasta el diseño de infraestructura y proyectos de construcción civil pesada. Sus intereses técnicos son el concreto basado en el rendimiento, la durabilidad a largo plazo, la capacidad de construcción y el concreto en masa. Es presidente del Comité de Enlace de Construcción del ACI y miembro de los Comités 134 del ACI, Constructibilidad de Concreto; 201, durabilidad del concreto; 207, Hormigón controlado térmicamente y en masa; 305, hormigonado en climas cálidos; 308, curado del concreto; y 321, Código de Durabilidad del Concreto; y miembro del Subcomité 301-H de ACI, Concreto en masa — Sección 8.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Puerto Rico

*Título: Durabilidad de concreto con cemento calizo de portland*



*Traductor y Revisor Técnico:  
José M. Mejía Borrero*