

Belitic Calcium Sulfoaluminate Concrete Runway

Looking back after 23 years in service

by Omkar Deo, Neel Bhuskute, Eric Bescher, Naga Pavan Vaddey, and Jose Pacheco

When built in 1969, what is now Runway 16C/34C at the Seattle-Tacoma International Airport (Sea-Tac), Seattle, WA, USA, consisted of 20 x 20 ft (6.1 x 6.1 m), 14 in. (356 mm) thick panels constructed using ordinary portland cement (OPC) concrete. Over a 13-year period starting in 1994, more than 500 of these panels were removed and replaced with 18 in. (457 mm) thick panels constructed using belitic calcium sulfoaluminate (BCSA) cement concrete.

To ensure airport operations were minimally affected, the specification limited runway closure from 10:30 p.m. to 6:00 a.m. The concrete was therefore required to achieve a flexural strength of 500 psi (3.4 MPa) at 6:00 a.m. or 4 hours after placement. Further, a flexural strength of 650 psi (4.5 MPa) was required at 28 days. The project was completed successfully, with two replacement panels constructed per shift, most concrete placements finished by 3:00 a.m., and all replacement panels meeting the required strengths.

A panel constructed in 1997 was removed in 2012,^{1,2} and beams were cut from this panel and were tested at the University of Oklahoma in 2013. Tests revealed a flexural strength of 1160 psi (8.0 MPa)—a considerable strength gain relative to specimens cast and tested in 1998 at the CTLGroup laboratories (what was then CTL) in Chicago, IL, USA. Further, cyclic tests revealed that the concrete retained high resistance to fatigue. Beams formed and tested in 1997 were reported to have 87 years of fatigue life based on the 20-year design of 1,150,000 cycles of loading by an MD-11 design aircraft. Beams tested after 15 years of service in the runway were shown to have 100 years of fatigue life.

Additional panels were removed in 2020, resulting in an opportunity to further evaluate the long-term performance of the BCSA cement concrete. Sections of a runway panel were subjected to laboratory testing at CTLGroup in 2021, after

roughly 23 years in service. This article discusses the findings of this evaluation.

BCSA Concrete

BCSA cement concrete is primarily used where rapid strength gain, high durability, and low shrinkage are desired. The unique property of this concrete is that it sets in approximately 15 minutes and is ready for traffic in only about an hour. BCSA cement also has lower limestone content and requires lower kiln temperature compared to OPC, leading to total CO₂ emissions of only 1654 lb (750 kg) per ton of BCSA cement produced.³ This equates to a reduction in carbon footprint by nearly 25% compared to OPC.

Hydration of BCSA cement involves the reaction of each of its phases. Depending on the availability of sulfates, the hydration products may vary. However, ettringite is the cement's main strength-imparting component. The rapid formation of ettringite provides high early-age strength, while the hydration of belite provides the later-age strength. Detailed hydration reactions are explained in the literature.^{4,5}

Mixture properties

Table 1 provides the mixture proportions and fresh properties, including slump, air content, unit weight, and yield of the BCSA concrete used in the project. The mixture design was developed and evaluated by testing concrete beams according to ASTM C78/C78M, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)," and per ASTM C666/C666M, "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing." Special cement concrete pavement specifications (Item P-503) were developed with the help of the Federal Aviation Administration (FAA) for this project. These specifications were in addition to the normal FAA Item

Table 1:
BCSA concrete mixture proportions and fresh properties

Material or fresh property	Amount or value
BCSA cement (Rapid Set®), lb/yd ³ (kg/m ³)	650 (385)
Fine aggregate, lb/yd ³ (kg/m ³)	1030 (611)
1.5 in. (38 mm) coarse aggregate, lb/yd ³ (kg/m ³)	1010 (599)
3/4 in. (19 mm) coarse aggregate, lb/yd ³ (kg/m ³)	1010 (599)
Air-entraining admixture (Daravair®), fl oz/yd ³ (mL/m ³)	6.5 (250)
Water-reducing admixture (mL-330®), fl oz/yd ³ (L/m ³)	228 (8.82)
Set-retarding admixture (Recover®), fl oz/yd ³ (L/m ³)	176 (6.81)
Water, lb/yd ³ (kg/m ³)	245 (145)
Water-cement ratio (w/c)	0.38
Slump, in. (mm)	6.5 (165)
Air content, %	5.10
Unit weight (density), lb/ft ³ (kg/m ³)	144 (2307)
Yield, ft ³ (m ³)	27.4 (1.01)

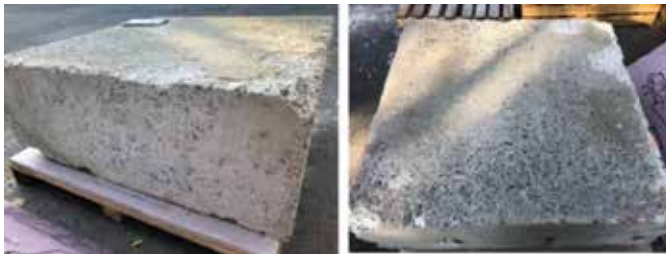


Fig. 1: BCSA runway slab sample taken after 23 years of service



Fig. 2: BCSA runway slab sample is prepared for cutting at the CTLGroup’s laboratory

P-501, Cement Concrete Pavement specifications,⁶ that apply to the conventional concrete airport pavements.

Extraction of Slab Sections

As part of the Port of Seattle’s 2020 Airfield Pavement and Supporting Infrastructure Replacement Projects, a 4 x 4 x 1.5 ft (1.22 x 1.22 x 0.45 m) slab was removed from a taxiway and submitted for laboratory testing. The wearing surface showed light to moderate abrasion (Fig. 1). Dowels at a depth of 8 in. (200 mm) from the surface were located on one side of the slab section at a spacing of about 13.5 in. (345 mm).

In the fall season of 2020, the slab section was delivered to the CTLGroup laboratory, where it was sawn per ASTM C42/C42M, “Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete,” using the equipment shown in Fig. 2. Concrete beams with a nominal dimension of 6 x 6 x 20 in. (150 x 150 x 510 mm) were extracted for fatigue and flexural strength testing from the upper and lower halves (~8.5 in. [216 mm] each) of the slab. This operation required precise sawing to maximize the number of specimens with the exact nominal dimensions as those used in the evaluation conducted in 1998. After extraction, the sawn beams were stored in saturated limewater until testing. In addition to sawn beams, core specimens were extracted and conditioned, also per ASTM C42/C42M. In addition to compressive strength tests, core specimens were used for pore solution analyses, carbonation depth evaluations, and petrographic evaluations (per ASTM C856/C856M, “Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete”). Samples were also examined using a scanning electron microscope (SEM).

Results and Discussion

Compressive and flexural strengths

After extraction, core specimens were subject to compressive strength per ASTM C39/C39M, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.” Prior to testing, the specimen ends were ground and conditioned per ASTM C42/C42M. Specimens with nominal dimensions of 4 x 6.5 in. (100 x 165 mm) were tested at a loading rate of 35 psi/s (241 kPa/s), and the appropriate correction factor was applied. The average corrected compressive strength of the BCSA concrete specimen was about 9600 psi (66.2 MPa), which can be considered reasonably high compared to cored specimens of typical portland cement concrete (PCC) of this age.⁷ The failure mode of the cored specimens was Type 1, indicating reasonably well-formed cones on both ends.

The average modulus of rupture or flexural strength of the beams cut from the upper half of the slab and measured per ASTM C78/C78M was 875 psi (6.0 MPa), while the average value for the beams from the lower half of the slab was 860 psi (5.9 MPa). A loading rate of approximately 150 psi/s (1034 kPa/s) was applied during the testing, and the fracture patterns for all the beams were observed to be within the

middle third of each. While the test results indicated a lower average value compared to what had been determined in 2012, the flexural strength was still more than 30% greater than the specified 28-day strength.

Fatigue testing

Flexural fatigue testing was performed with an ASTM C78/C78M setup of an MTS unit instrumented for cyclic loading, as shown in Fig. 3. Test specimens for fatigue testing were extracted from the upper portion of the concrete slab at about 1 in. (25 mm) below the surface. The top 1 in. concrete was removed to avoid issues related to surface imperfections that would affect the application of the load or the stress distribution at the concrete surface. Figure 4 shows the correlation between the fatigue results—that is, the number of load applications to failure, N, versus stress ratio, S (normalized), for the specimens tested at the CTLGroup laboratory in 2021, labeled “2021 CTL Tests.” It is observed that some specimens tested at the same stress ratio show a wide discrepancy in the number of load applications to failure. Excess sawing may have enhanced the porosity or created other defects in the specimens, leading to an improper assessment of fatigue life.

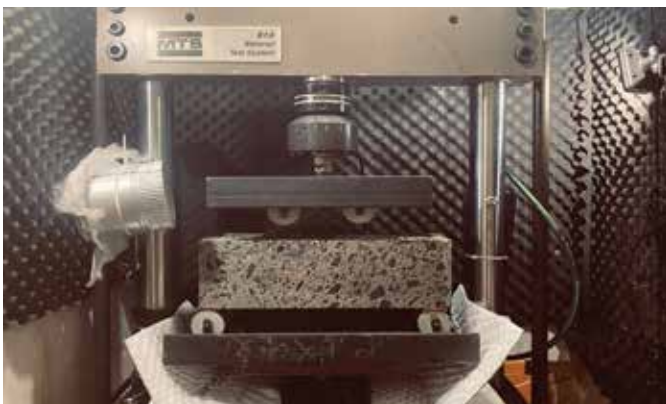


Fig. 3: Fatigue testing setup

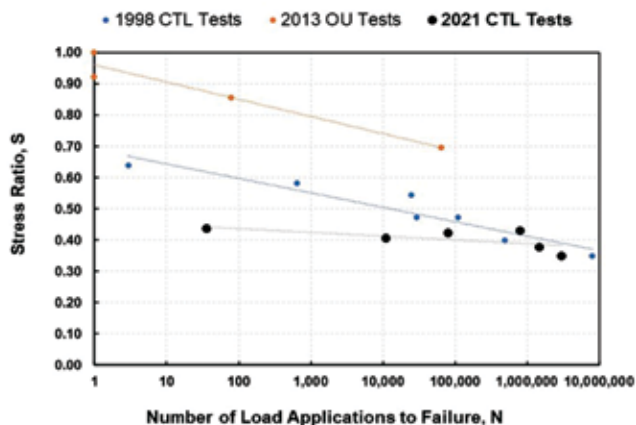


Fig. 4: A comparison of fatigue test results of BCSA concrete, including data from the slab sample taken from the Sea-Tac airport in 2021, the data obtained by the CTLGroup during the rehabilitation project, and data obtained in 2013 at the University of Oklahoma

In the same figure, a comparison is also made with similar tests carried out on the Sea-Tac slab specimens at CTLGroup and the University of Oklahoma in 1998 and 2013, respectively.

A comparison of the 2021 tests of BCSA specimens is also made with a comprehensive set of results compiled for PCCs by the Portland Cement Association (PCA). These results (see Fig. 5) indicate that the performance observed after 23 years of service correlates well with the PCA fatigue design curve. When the stress ratio was less than 0.55, load applications exceeding 1 million cycles were achieved, showing a marginal effect on fatigue performance after 23 years in service. Further, it should be noted that the BCSA specimens had already been subjected to many load cycles at the onset of each test, so the data points could be shifted to the right to reflect the actual performance.

Pore solution chemistry

The pore solution of the concrete was evaluated by a method described by Barneyback and Diamond.⁸ A concrete sample was crushed to remove coarse aggregate particles to obtain at least 100 g (3.5 oz) of mortar. Subsequently, the mortar sample was placed in a confined pressure vessel subject to pressure up to 400,000 psi (2758 MPa) for up to 10 minutes of pressurized time. The chemistry of the pore solution was determined through inductively coupled plasma (ICP) and atomic absorption spectrometry (AAS) methods. The average chemical composition of the extracted pore solution and its pH are listed in Table 2. It is worth noting that the pH of the paste was measured at 12.4.

During the extraction process, it was observed that

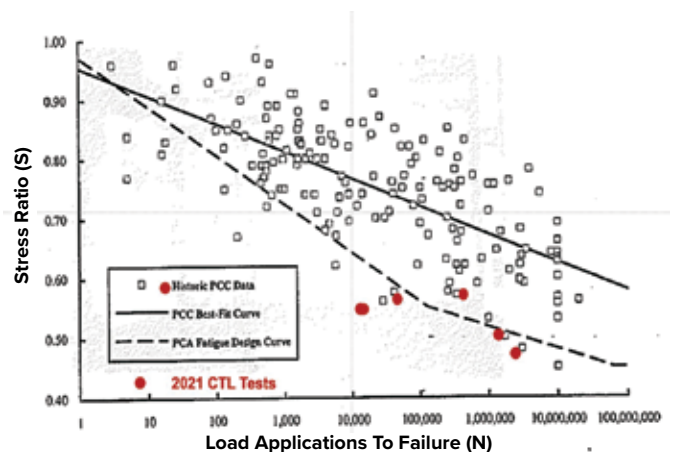


Fig. 5: The 2021 fatigue test data of the BCSA concrete slab from the Sea-Tac (red dots) in comparison to the PCA collected data

Table 2:

Pore solution chemistry of the BCSA concrete used at Sea-Tac after 23 years of service in ppm

Ca	Al	Mg	S	Si	pH
12,300	2940	573	4910	3690	12.4



Fig. 6: Thin-section micrograph of hardened BCSA concrete, taken using a plain-polarized light source. The field of view is 0.03 in. (0.76 mm) across. Almost complete hydration is observed. The red arrow indicates a trace of residual calcium sulfoaluminate cement in the paste

extracting pore solution from a calcium sulfoaluminate system was more challenging than from the OPC systems. Even at pressures substantially higher and pressure durations significantly longer than those needed for the OPC systems, a total pore solution volume of up to 10 mL (0.3 fl oz) was extracted. This volume is dramatically less than what would otherwise be expected from conventional concretes after 23 years. The small volume of the extracted solution suggests extremely low levels of free water in the BCSA concrete. Because this water is known to affect corrosion, carbonation, and alkali-silica reaction (ASR), the low amounts in this concrete can indicate a higher resistance to corrosion and carbonation compared to portland cement-based concretes.

Microstructure evaluation

Figure 6 shows the concrete micrograph from a core specimen examined per ASTM C856/C856M. The sampled concrete consisted of igneous rocks and fine-grained

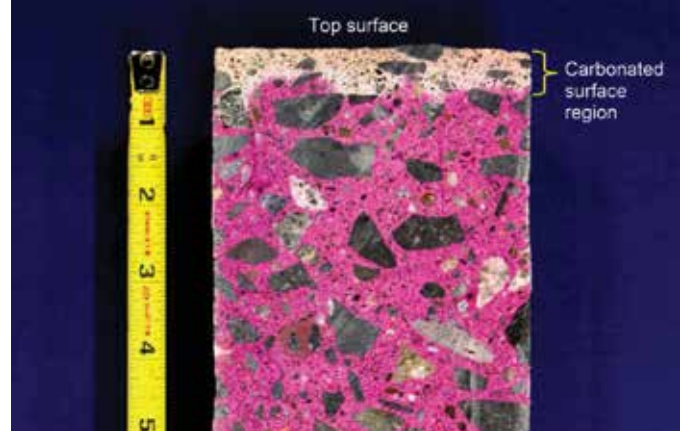


Fig. 7: A saw-cut cross section of the BCSA concrete core with pH indicator (phenolphthalein), which imparts a magenta stain to high-pH, non-carbonated paste but does not stain carbonated concrete. Scale in inches (Note: 1 in. = 25 mm)

sedimentary rocks. The calcium sulfoaluminate cement was found to be almost fully hydrated with minor trace amounts of unhydrated or partially hydrated cement grains (indicated with a red arrow in Fig. 6), which would most likely be the belite component. The carbonation depth was found to range between 0.4 and 0.6 in. (10 and 15 mm), as shown in Fig. 7. The estimated air content of the concrete was between 7 and 9%. The petrographic and SEM images showed no signs of ASR or ASR gel formation (see Fig. 8).

Long-Term Performance

The BCSA cement concrete slab section taken after 23 years of service in Sea-Tac Runway 16C showed no significant signs of reduced performance or deterioration.

Acknowledgments

The authors wish to express their sincere appreciation to Saher Khilfeh and Chris Coulter at the Port of Seattle for their help with providing access to the runway slabs for evaluation. The authors also thank Chris Ramseyer of the University of Oklahoma and Danny Chung at Caltrans for providing additional information and testing data on the Sea-Tac runway slab.

References

1. Ramseyer, C., and Bescher, E., "Performance of Concrete Rehabilitation Using Rapid-Setting Calcium Sulfoaluminate Cement at Seattle-Tacoma Airport," *TRB 93rd Annual Meeting Compendium of Papers*, Transportation Research Board, Washington, DC, 2014, 14 pp.
2. McNERNEY, M.T.; KHILFEH, S.; and BESCHER, E.P., "Rapid-Setting Belitic Calcium Sulfoaluminate Concrete Pavement at Seattle-Tacoma International Airport: A 25-Year History," *International Conference on Transportation and Development 2020*, G. Zhang, ed., ASCE, Reston, VA, Aug. 31, 2020, pp. 158-168.
3. "Environmental Product Declaration for Various Cement Products Produced by CTS Cement Manufacturing Corporation at their CTS Plant Facility," Labeling Sustainability, Los Angeles, CA,

aci American Concrete Institute
Always advancing

Valuable. Easy.

"ACI is the premier organization for the concrete industry. Becoming an active member will enhance anyone's professional career." —John F.

**ACI Membership means high value.
ACI members know it.**

Join now at concrete.org.

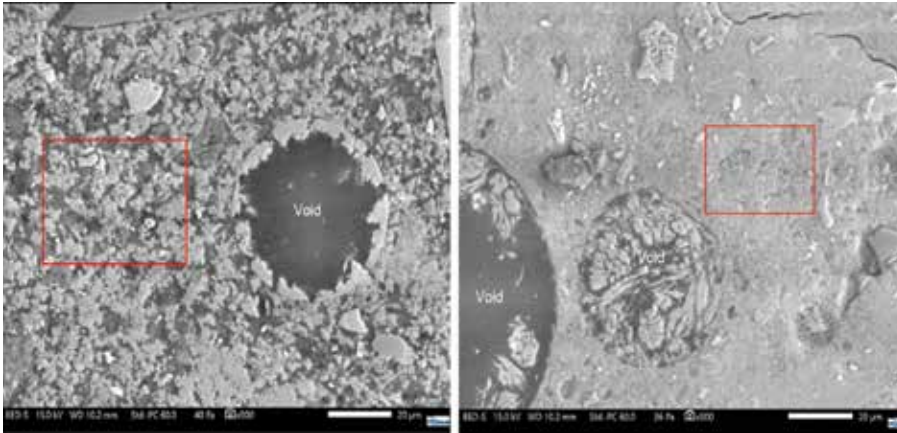


Fig. 8: On the left, the SEM image of the carbonated top-surface region. An air void is lined with deposits of calcium carbonate. On the right, the SEM image of the concrete body. Air voids are lined with deposits of ettringite. The paste in the body appears more uniform and denser than the carbonated top-surface region

Jan. 27, 2022, p. 19. https://www.labelingsustainability.com/_files/ugd/5fea69_6e0e944f60784272b506586eb31b12ec.pdf

4. Chen, I.A., and Juenger, M.C.G.,

“Synthesis and Hydration of Calcium Sulfoaluminate-Belite Cements with Varied Phase Compositions,” *Journal of Material Science*, V. 46, No. 8, Apr. 2011, pp. 2568-2577.

5. Glasser, F.P., and Zhang, L., “High-Performance Cement Matrices Based on Calcium Sulfoaluminate-Belite Compositions,” *Cement and Concrete Research*, V. 31, No. 12, Dec. 2001, pp. 1881-1886.

6. ACI 150/5370-10H, “Standard Specifications for Construction of Airports,” Federal Aviation Administration, Washington, DC, Dec. 21, 2018, 727 pp.

7. Dolen, T.P., “Material Properties Model of Aging Concrete,” Report DSO-05-05, Bureau of Reclamation, Denver, CO, Dec. 2005, 50 pp.

8. Barneyback, R.S., and Diamond, S., “Expression and Analysis of Pore Fluids from Hardened Cement Pastes and Mortars,” *Cement and Concrete Research*, V. 11, No. 2, Mar. 1981, pp. 279-285.

Selected for reader interest by the editors.



Omkar Deo is a Research Scientist at the CTS Cement Manufacturing Corporation, Garden Grove, CA. His research interests are in the areas of innovative, sustainable, and high-performance low-carbon cement and concrete materials. He received his PhD in civil and environmental engineering from Clarkson University, Potsdam, NY, USA.



Neel Bhuskute is a Research Engineer at the CTS Cement Manufacturing Corporation, Garden Grove, CA. His research interests are in the areas of sustainability, durability, and long-term performance of belitic calcium sulfoaluminate cement-based concretes. He received his master’s degree in materials science and engineering from

University of California, Los Angeles, Los Angeles, CA.



ACI member **Eric Bescher** is Adjunct Professor of Materials Science and Engineering at the University of California, Los Angeles, and has been working in the field of calcium sulfoaluminate cements for the last 25 years. He is a member of ACI Committee 242, Alternative Cements.



ACI member **Naga Pavan Vaddey** is an Associate at CTLGroup, Skokie, IL. His research interests include the durability of concrete, corrosion assessment of reinforced concrete systems, and service life modeling. He is a member of ACI Committees 212, Chemical Admixtures; 222, Corrosion of Metals in Concrete; and 365, Service Life Prediction. He

received his PhD from Oregon State University, Corvallis, OR, USA.



ACI member **Jose Pacheco** is Associate Principal Consultant with MJ2 Consulting, PLLC, Bannockburn, IL. He is a member of ACI Committees 222, Corrosion of Metals in Concrete; 357, Offshore and Marine Concrete Structures; 365, Service Life Prediction; and 563, Specifications for Repair of Structural Concrete in Buildings; and ACI Subcommittee 562-I, Durability.

He is a licensed professional engineer in British Columbia, Manitoba, and Ontario, Canada; as well as Michigan, Texas, and Washington, USA; and Mexico.

Pista de concreto con cemento sulfoaluminoso belítico

Retrospectiva luego de 23 años de servicio

*Por Omkar Deo, Neel Bhuskute, Eric Bescher, Naga Pavan Vaddey,
and Jose Pacheco*

Luego de construirse en el 1969, lo que ahora es la Pista 16C/34C en el Aeropuerto Internacional Seattle-Tacoma (Sea-Tac), en Seattle, WA, EE. UU., consistía en losas 20 x 20 pies (6.1 x 6.1 metros), por 14 pulgadas de espesor construidas utilizando concreto de cemento portland ordinario (CPO). En un periodo de 13 años, comenzando en 1994, más de 500 losas fueron removidas y reemplazadas por losas de 18 pulgadas (457 mm) de espesor construidas utilizando concreto de Cemento de Sulfoaluminato de Calcio Belítico (CBSA).

Para asegurar que las operaciones del aeropuerto fueran afectadas en lo mínimo, las especificaciones limitaron que los cierres de pista fueran de 10:30 p.m. a 6:00 a.m. Por esta razón se requería que el concreto alcanzara un esfuerzo en flexión de 500 psi (3.4 MPa) a las 6:00 a.m. o 4 horas luego de haber sido fundido. Además, fue requerido un esfuerzo en flexión de 650 psi (4.5 MPa) a los 28 días. El proyecto fue completado exitosamente, construyendo dos losas por jornada, terminando las fundidas de concreto a las 3:00 a.m., junto con todas las losas cumpliendo con los esfuerzos requeridos.

En el 2012^{1,2} se removió una losa construida en 1997; de esta se cortaron vigas que fueron ensayadas en el 2013 en la Universidad de Oklahoma. Los ensayos mostraron un esfuerzo a flexión de 1160 psi (8.0 MPa) – un incremento considerable comparado con los especímenes probados en 1998 en los laboratorios de CTL Group en Chicago, IL, EEUU. Aún más, los estudios cíclicos mostraron que el concreto retuvo altas resistencias a fatiga. Las vigas que fueron creadas y probadas en 1997 reportaron tener una vida de fatiga de 87 años, basado en un diseño de 20 años con 1,150,000 cargas cíclicas de un avión MD-11. Vigas que fueron probadas luego de 15 años de servicio en la pista mostraron tener una vida de fatiga de 100 años.

En el 2020 se removieron otras losas adicionales, dando la oportunidad de seguir evaluando el rendimiento a largo plazo de un concreto con cemento CBSA. En el 2021 luego de casi 23 años de servicio, secciones de la losa de la pista fueron sujetos a pruebas de laboratorio en CTL Group. Este artículo discute los hallazgos de esa evaluación.

Concreto CBSA

El concreto de cemento CBSA es utilizado primordialmente en situaciones en el que se desea obtener altas resistencias de manera rápida, alta durabilidad y baja retracción.

La única propiedad de este concreto es que fragua aproximadamente en 15 minutos y está listo para el tráfico en alrededor de una hora. El cemento sulfoaluminoso tiene bajo contenido de caliza y requiere más baja temperatura de clínquerización comparado con el CPO, por lo que lleva a una emisión total de CO₂ de 1654lb (750kg) por tonelada de CBSA producido.³ Esto equivale a una reducción en la huella de carbono de casi un 25% en comparación con el CPO.

La hidratación de cemento CBSA involucra la reacción de cada una de sus fases. Dependiendo de la disponibilidad de sulfatos, los productos de hidratación pueden variar. No obstante, la etringita es el componente que más genera resistencia en el cemento. La rápida formación de etringita provee altas resistencias a edades tempranas, mientras que la hidratación de la belita provee resistencia a edades tardías.^{4,5}



Fig. 1 Muestra de losa CBSA de la pista, tomada después de 23 años de servicio

Propiedades de las mezclas

La Tabla 1 provee las proporciones para las mezclas y propiedades en estado fresco, incluyendo asentamiento, contenido de aire, peso unitario y el rendimiento del concreto CBSA utilizado en el proyecto. El diseño de mezcla fue desarrollado y evaluado ensayando vigas de concreto de acuerdo con la norma ASTM C78/C78M, “Método de Prueba Estándar para Concreto en Esfuerzo de Flexión (Utilizando Cargas de Tres Puntos en una Viga Simple)”, y la norma ASTM C666/C666M, “Método de Prueba Estándar para la Resistencia del Concreto al Congelamiento y Descongelamiento”.

Tabla 1: Proporcionamiento de mezcla del concreto BCSA y propiedades en estado fresco.

Material o Propiedad en estado fresco	Cantidad o Valor
Cemento BCSA (Rapid Set®), lb/yd ³ (kg/m ³)	650 (385)
Agregado Fino, lb/yd ³ (kg/m ³)	1030 (611)
1.5 in. (38 mm) agregado grueso, lb/yd ³ (kg/m ³)	1010 (599)
3/4 in. (19 mm) agregado grueso, lb/yd ³ (kg/m ³)	1010 (599)
Aditivo Incorporador de Aire (Daravair®), fl oz/yd ³ (mL/m ³)	6.5 (250)
Aditivo Reductor de Agua (mL-330®), fl oz/yd ³ (L/m ³)	228 (8.82)
Aditivo de Retardación de Fraguado (Recover®), fl oz/yd ³ (L/m ³)	176 (6.81)
Agua, lb/yd ³ (kg/m ³)	245 (145)
Relación Agua-Cemento (w/c)	0.38
Asentamiento, in. (mm)	6.5 (165)
Contenido de Aire, %	5.10
Peso Unitario (densidad), lb/ft ³ (kg/m ³)	144 (2307)
Rendimiento, ft ³ (m ³)	27.4 (1.01)



Fig. 2: Se prepara una muestra de losa CBSA para ser cortada en el laboratorio de CTLGroup

Especificaciones especiales para pavimentos de concreto (Artículo P-503) fueron desarrolladas para este proyecto con la ayuda de la Administración Federal de Aviación (FAA por sus siglas en inglés). Estas especificaciones fueron una adición al artículo normal de la FAA, P-501, Especificaciones para pavimentos de concreto⁶ que son utilizados en la construcción convencional de pavimentos de concreto en aeropuertos.

Extracción de las secciones de losa

Como parte de los proyectos de Reemplazo de Pavimentos de Aeropuertos e Infraestructuras Secundarias de la Autoridad de Puertos de Seattle para el 2020, se removió una losa de la vía de rodaje de 4 x 4 x 1.5 pies (1.22 x 1.22 x 0.45 metros) y fue sometida a pruebas en laboratorio. La superficie de rodaje mostraba un desgaste ligero a moderado (Fig. 1). En una cara de la sección de la losa se encontraron barras de refuerzo a una profundidad de 8 pulgadas (200 mm) y espaciadas a unas 13.5 pulgadas (345 mm).

En la temporada de otoño del 2020, la sección de la losa fue entregada al laboratorio de CTL Group, donde fue cortada de acuerdo a la ASTM C42/C42M, “Método de Prueba Estándar para Obtener y Ensayar Núcleos de Concreto Taladrados y Vigas de Concreto Cortadas”, utilizando el equipo mostrado en la Fig. 2. Se extrajo vigas de concreto a un tamaño nominal de 6 x 6 x 20 pulgadas de la parte superior e inferior de la losa (~8.5 pulgadas [216 mm] cada una) para realizar pruebas de fatiga y de esfuerzo en flexión. Esta operación requirió de unos cortes precisos para maximizar la cantidad de especímenes con las dimensiones nominales exactas como aquellas que se usaron en la evaluación realizada en 1998. Luego de ser cortadas, las vigas se acondicionaron en un baño de agua de cal saturada hasta que fueron utilizadas para las pruebas. Además de las vigas cortadas, se extrajeron núcleos de concreto y fueron acondicionados según la ASTM C42/C42M. Adicional a las pruebas de resistencia a la compresión, los núcleos fueron utilizados para análisis de la solución de poros, evaluación de profundidad de carbonatación, y evaluación petrográfica (según la ASTM C856/C856M, “Práctica Estándar para Examinación Petrográfica de Concreto Endurecido”). Las muestras también fueron examinadas utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM).

Resultados y Discusión

Esfuerzos en Compresión y Flexión

Luego de la extracción, los núcleos de concreto fueron sometidos a pruebas de resistencia a la compresión de acuerdo a la norma ASTM C39/C39M, “Método de Prueba Estándar para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto”. Antes de ser ensayados, los especímenes fueron acondicionados según la norma ASTM C42/C42M. Los especímenes con dimensiones nominales de 4 x 6.5 pulgadas (100 x 165 mm) fueron ensayados con una velocidad de carga de 35 psi/s (241 kPa/s), y se les aplicó el factor de corrección apropiado. La resistencia a la compresión promedio corregida de los especímenes de concreto fue de 9600 psi (66.2 MPa), lo cual es considerado alto comparado con los especímenes de un concreto de cemento portland (PCC) de esta edad.⁷ El modo de falla de los especímenes fue Tipo 1, indicando que se formaron conos a ambos extremos.

El módulo rotura promedio o resistencia a la flexión de las vigas cortadas de la mitad superior de la losa y medidas por ASTM C78/C78M fue de 875 psi (6.0 MPa), mientras que el valor promedio de la vigas de la mitad inferior de la losa fue de 860 psi (5.9MPa). Una velocidad de carga de aproximadamente de 150 psi/s (1034 kPa/s) fue aplicada durante el ensayo y se observó que los patrones de fractura para todas las vigas quedaron dentro del tercio medio de cada una. Si bien los resultados de las pruebas indicaron un valor promedio más bajo en comparación con lo que se había determinado en 2012, la resistencia a la flexión aún era un 30 % mayor que la resistencia especificada a los 28 días.

Prueba de Fatiga

Pruebas de fatiga por flexión fueron realizadas con una unidad MTS instrumentada para cargas cíclicas según la configuración de la ASTM C78/C78M, mostrado en la Fig. 3. Los especímenes de prueba de fatiga fueron extraídos de la parte superior de la losa, aproximadamente 1 pulgada (25 mm) por debajo de la superficie. La pulgada superior de la losa de concreto fue removida para evitar problemas relacionados a imperfecciones de la superficie que pudieran afectar la aplicación de cargas o la distribución de los esfuerzos en la superficie del concreto. La Figura 4 muestra la correlación entre los resultados de fatiga esto es, el número de cargas aplicadas hasta fallar, N , versus la razón de esfuerzo, S (normalizada), para los especímenes probados en el laboratorio de CTL Group en el 2021, denominados “Pruebas CTL 2021”. Se observa que algunas probetas ensayadas con la misma relación de esfuerzo muestran una gran discrepancia en el número de aplicaciones de carga hasta la rotura. Cortes indebidos pudieron ocasionar un incremento en la porosidad o haber creado defectos en el espécimen, llevando a una evaluación incorrecta de la fatiga.

En la misma figura, se hace una comparación con ensayos similares obtenidos de los especímenes de las losas de Sea-Tac realizados en CTL Group y la Universidad de Oklahoma en 1998 y 2013 respectivamente.

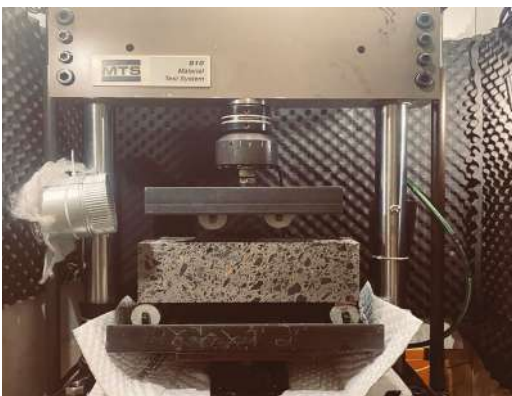


Fig. 3: Configuración de las pruebas de fatiga

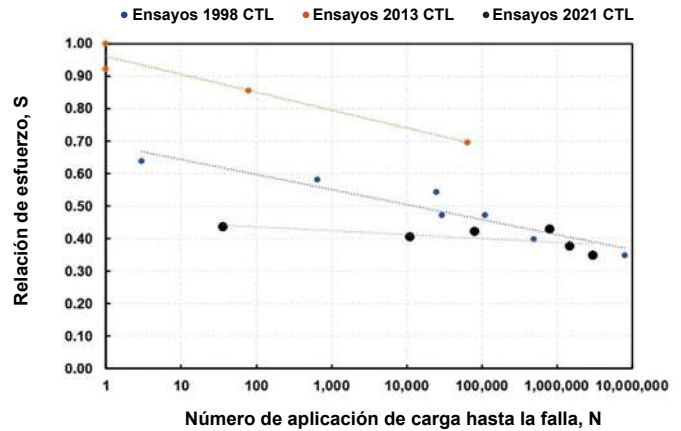


Fig. 4: Una comparación de los resultados de las pruebas de fatiga del concreto CBSA, incluyendo los datos de la muestra de losa tomada del aeropuerto Sea-Tac en 2021, los datos obtenidos por CTLGroup durante el proyecto de rehabilitación y los datos obtenidos en 2013 en la Universidad de Oklahoma

De igual manera, se hace una comparativa de las pruebas de concreto CBSA realizadas en el 2021 y el compendio de resultados obtenidos por la Asociación de Portland Cement (PCA por sus siglas en inglés). Estos resultados (véase la Fig. 5) indican que el desempeño observado luego de 23 años en servicio se correlaciona bien con la curva de diseño de la fatiga de la PCA. Cuando la relación de esfuerzo era menor de 0.55, se lograba exceder 1 millón de ciclos de aplicación de cargas, mostrando un efecto marginal del rendimiento de fatiga luego de 23 años en servicio. No obstante, se debe hacer una nota sobre los especímenes de CBSA los cuales ya habían sido sometidos a muchos ciclos de carga al inicio de cada prueba, por lo que los datos podrían desplazarse a la derecha para reflejar el desempeño real.

Ca	Al	Mg	S	Si	pH
12,300	2,940	573	4910	3690	12.4

Tabla 2: Composición química de la solución de poros del concreto CBSA utilizado en Sea-Tac después de 23 años de servicio en ppm

Química de la solución de poros

La solución de poros del concreto fue evaluada por una metodología descrita por Barneyback and Diamond.⁸ Se tomó una muestra de concreto y fue molida para remover los agregados grueso y así obtener al menos 100 gramos (3.5 oz) de mortero. Subsiguiente, las muestras de mortero fueron colocadas en un recipiente de confinamiento a presión y sometido a una presión de hasta 400,000 psi (2758 MPa) por casi 10 minutos. La composición química de la solución de poros fue determinada por los métodos de plasma acoplado inductivamente (PAI) y espectrometría de absorción atómica (SAA). La composición química promedio de la solución de poros extraída y su pH se muestran en la Tabla 2. Cabe resaltar que el pH medido de la pasta fue de 12.4.

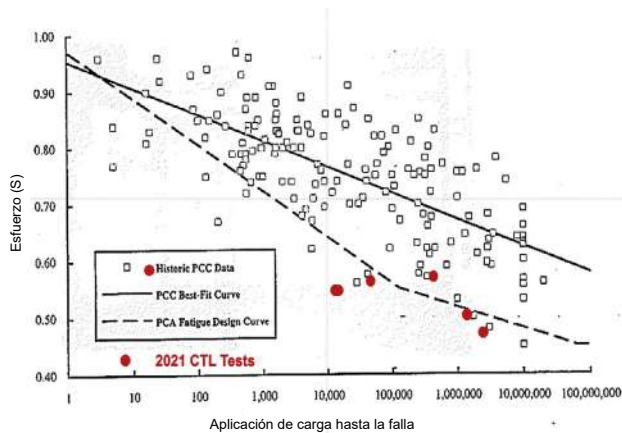


Fig. 5: Los datos de prueba de fatiga de 2021 de la losa de concreto CBSA del Sea-Tac (puntos rojos) en comparación con los datos recopilados por la PCA

Durante el proceso de extracción, se observó que extraer soluciones de poros de los sistemas de calcio sulfoaluminosos demandó de más trabajo en comparación a los sistemas CPO. Incluso a presiones sustancialmente más altas y duraciones de presión significativamente más largas que las necesarias para los sistemas CPO, se



Fig. 6: Micrografía de sección delgada de hormigón CBSA endurecido, tomada utilizando una fuente de luz de polarización simple. El campo de visión es de 0.03 pulgadas (0.76 mm) de ancho. Se observa una hidratación casi completa. La flecha roja indica un rastro de cemento sulfoaluminato de calcio residual en la pasta

extrajo un volumen total de solución de poro de hasta 10 ml (0,3 fl oz).

Este volumen es dramáticamente menor al que se esperaría de un concreto convencional con más de 23 años de servicio. El poco volumen extraído sugiere que el concreto CBSA contiene niveles extremadamente bajos de agua. Como se conoce que el agua tiene un efecto en la corrosión, carbonatación, y la reacción álcali-silice (ASR), las bajas cantidades en este muestran una alta resistencia a la corrosión y la carbonatación en comparación con los concretos de cemento portland.

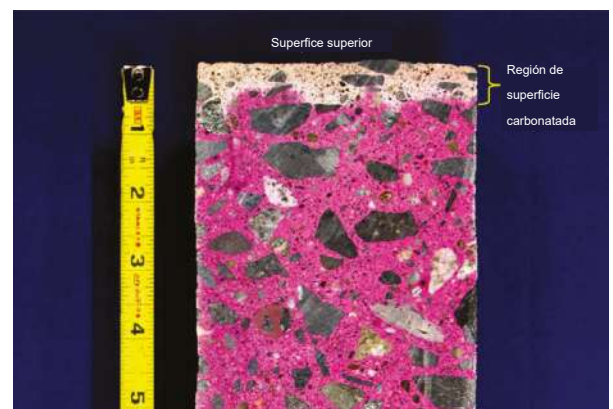


Fig. 7: Una sección transversal cortada con sierra un núcleo de concreto CBSA con indicador de pH (fenoftaleína), que genera una mancha magenta a la pasta no carbonatada de pH alto y que no mancha el concreto carbonatado. Escala en pulgadas (Nota: 1 pulg. = 25 mm)

Evaluación de microestructura

La Figura 6 muestra la micrografía de un núcleo de concreto según el ASTM C856/C856M. La muestra de concreto consiste en roca ígnea y rocas sedimentarias de grano fino. El cemento de sulfoaluminato de calcio mostró estar completamente hidratado con bajas cantidades de partículas no hidratadas o parcialmente hidratadas (indicado por una flecha roja en la Fig. 6), que muy probable sería el componente belita. La profundidad de carbonatación se mantuvo entre 0.4 y 0.6 pulgadas (10 y 15 mm), según se muestra en la Fig. 7. El contenido de aire estimado del concreto fue entre 7 y 9%. Las imágenes petrográficas y SEM no mostraron señal de ASR o formación de gel ASR (véase Fig. 8).

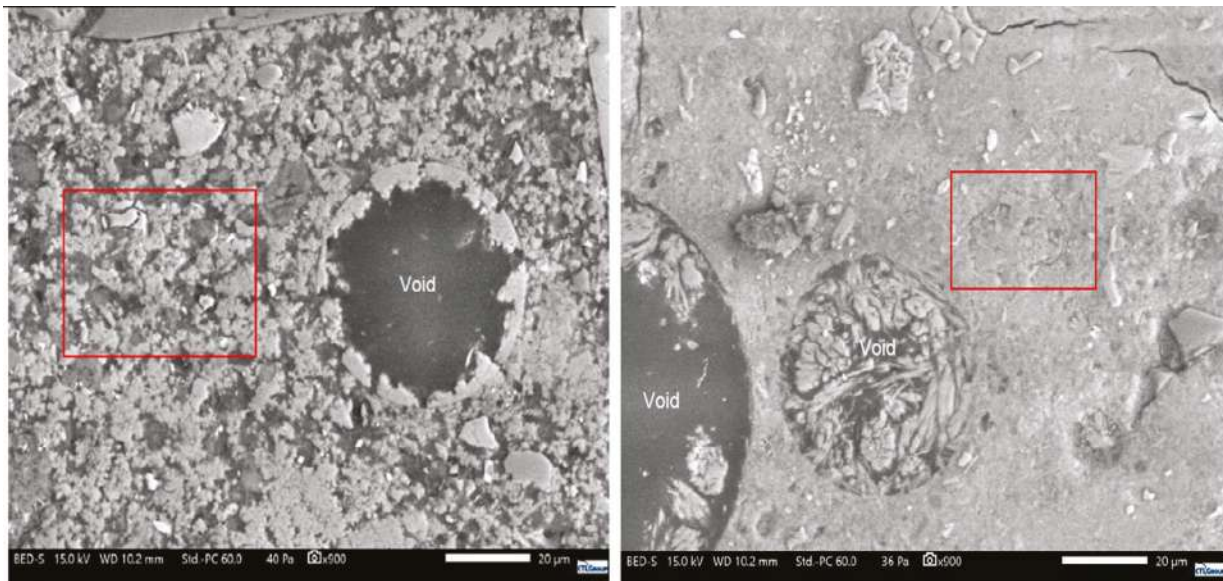


Fig. 8: A la izquierda, la imagen SEM de la región carbonatada de la superficie superior. Un vacío de aire está revestido con depósitos de carbonato de calcio. A la derecha, la imagen SEM del cuerpo de hormigón. Los huecos de aire están revestidos con depósitos de etringita. La pasta en el cuerpo parece más uniforme y densa que la región carbonatada de la superficie superior.

Desempeño a largo plazo

La sección de losa de concreto de cemento CBSA obtenida de la pista 16C del Sea-Tac luego de 23 años de servicio mostró no tener ningún tipo de reducción en su desempeño o deterioro.

Reconocimiento

Los autores desean expresar su más sincero aprecio por Saher Khilfeh y Chris Coulter del Puerto de Seattle, por su ayuda en proveer acceso a las losas de la pista para su evaluación. Los autores también agradecen a Chris Ramseyer de la Universidad de Oklahoma y a Danny Chung de Caltrans por proveer información adicional de los resultados obtenidos de las losas de la pista de Sea-Tac.

Referencias

1. Ramseyer, C., and Bescher, E., "Performance of Concrete Rehabilitation Using Rapid-Setting Calcium Sulfoaluminate Cement at Seattle-Tacoma Airport," TRB 93rd Annual Meeting Compendium of Papers, Transportation Research Board, Washington, DC, 2014, 14 pp.
2. McNerney, M.T.; Khilfeh, S.; and Bescher, E.P., "Rapid-Setting Belitic Calcium Sulfoaluminate Concrete Pavement at Seattle-Tacoma International Airport: A 25-Year History," International Conference on Transportation and Development 2020, G. Zhang, ed., ASCE, Reston, VA, Aug. 31, 2020, pp. 158-168.
3. "Environmental Product Declaration for Various Cement Products Produced by CTS Cement Manufacturing Corporation at their CTS Plant Facility," Labeling Sustainability, Los Angeles, CA, Jan. 27, 2022, p. 19. https://www.abelingsustainability.com/_files/ugd/5fea69_6e0e944f-60784272b506586eb31b12ec.pdf
4. Chen, I.A., and Juenger, M.C.G., "Synthesis and Hydration of Calcium Sulfoaluminate-Belite Cements with Varied Phase Compositions," Journal of Material Science, V. 46, No. 8, Apr. 2011, pp. 2568-2577.
5. Glasser, F.P., and Zhang, L., "High-Performance Cement Matrices Based on Calcium Sulfoaluminate-Belite Compositions," Cement and Concrete Research, V. 31, No. 12, Dec. 2001, pp. 1881-1886.

6. AC 150/5370-10H, "Standard Specifications for Construction of Airports," Federal Aviation Administration, Washington, DC, Dec. 21, 2018, 727 pp.

7. Dolen, T.P., "Material Properties Model of Aging Concrete," Report DSO-05-05, Bureau of Reclamation, Denver, CO, Dec. 2005, 50 pp.

8. Barneyback, R.S., and Diamond, S., "Expression and Analysis of Pore Fluids from hardened Cement Pastes and Mortars," *Cement and Concrete Research*, V. 11, No. 2, Mar. 1981, pp. 279-285.

Seleccionado por los editores para el interés de los lectores.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Puerto Rico

Título: Pista de concreto calcio belítico sulfoaluminato. Retrospectiva luego de 23 años de servicio



Traductor:
Jose M. Mejia Borrero



Revisora Técnica:
Anabel N. Merejido



Omkar Deo es científico investigador en CTS Cement Manufacturing Corporation, Garden Grove, CA. Sus intereses de investigación se centran en las áreas de cemento y hormigón innovadores, sostenibles y de alto rendimiento y bajo contenido de carbono. Recibió su doctorado en ingeniería civil y ambiental de la Universidad de Clarkson, Potsdam, NY, EE.UU.



Neel Bhuskute es ingeniero de investigación en CTS Cement Manufacturing Corporation, Garden Grove, CA. Sus intereses de investigación se centran en las áreas de sostenibilidad, durabilidad y rendimiento a largo plazo de los hormigones a base de cemento de sulfoaluminato de calcio belítico. Recibió su maestría en ciencia e ingeniería de materiales de la Universidad de California, Los Ángeles, Los Ángeles, CA.



Eric Bescher, miembro de ACI, es profesor adjunto de Ciencia e Ingeniería de Materiales en la Universidad de California, Los Ángeles, y ha estado trabajando en el campo de los cementos de sulfoaluminato de calcio durante los últimos 25 años. Es miembro del Comité ACI 242, Cementos Alternativos.



Naga Pavan Vaddey, miembro de ACI, es asociada en CTLGroup, Skokie, IL. Sus intereses de investigación incluyen la durabilidad del concreto, la evaluación de la corrosión de los sistemas de hormigón armado y el modelado de la vida útil. Es miembro de los Comités ACI 212, Aditivos Químicos; 222, corrosión de metales en concreto; y 365, Predicción de la vida útil. Recibió su doctorado de la Universidad Estatal de Oregón, Corvallis, OR, EE.UU.



José Pacheco, miembro de ACI, es Consultor Principal Asociado con MJ2 Consulting, PLLC, Bannockburn, IL. Es miembro de los Comités ACI 222, Corrosión de Metales en Concreto; 357, estructuras de hormigón marinas y en alta mar; 365, predicción de la vida útil; y 563, Especificaciones para la reparación de hormigón estructural en edificios; y ACI Subcomité 562-I, Durabilidad. Es ingeniero profesional licenciado en Columbia Británica, Manitoba y Ontario, Canadá; así como Michigan, Texas y Washington, Estados Unidos; y México.