

# Minimizing the Risk for Portland-Limestone Cement Concrete Slabs

Best practices and strategies to reduce floor slab finishing and early-age, strength-critical challenges

by James Klinger, Joseph F. Neuber Jr., Jeffrey Ondo, and Bruce A. Suprenant

**W**hile many contractors have successfully placed and finished concrete slabs constructed using Type IL cement (portland-limestone cement [PLC]), others have struggled with project delays and unacceptable finishes. To find the root causes of unsuccessful outcomes, jobsite data such as mixture proportions, weather conditions, construction practices and equipment, and finish requirements must be evaluated.

This article discusses early-age, strength-critical construction operations such as saw cutting, cold weather protection, post-tensioning, and form removal, as well as best practices and strategies to minimize risks during floor slab finishing and early-age, strength-critical construction. This article also provides data collected on six mockups constructed with Type IL cement and one mockup constructed with Type I cement.

The authors encourage others to share their data and experiences with Type IL cement.

## Concrete Finishing Challenges

The outcomes of concrete slab placements are highly dependent on the mixture constituents and the fresh concrete properties such as slump, air content, bleeding rate, and setting time. The sensitivity of the fresh concrete to the environment impacts the finisher's techniques and timing to produce a quality product. One major factor that separates slabs requiring a trowel finish from slabs designed as paving<sup>1-4</sup> is the length of time the fresh concrete slab is exposed to the environment. For slipform paving, Poole<sup>5</sup> indicated that final finishing is usually completed within a few minutes of placing the concrete, well before the time of initial setting and the end of the bleeding period. For slabs to receive a trowel finish, final finishing may occur 3 to 8 hours after placement, with the longest delays occurring in cold weather with high relative humidity. This extended exposure time poses a substantial risk to contractors who are tasked with turning a sensitive,

perishable product into a quality hardened product for the owner. Thus, slipform paving and parking lot examples are not comparable to slabs specified to receive a trowel finish.

## Survey on PLC Concrete

The recent Joint ACI-ASCC Survey on PLC Concrete (to be published in the February 2024 issue of *Concrete International*) posed questions to elicit user experiences with finishing and performance of slabs requiring a trowel finish. The percentages reported in the following section represent the answers from 173 respondents. As the survey shows, fresh concrete properties changed when the cement changed.

Reported changes in fresh concrete properties associated with changing from Type I cement to Type IL cement include:

- Water demand—77% reported an increase while 7% reported a decrease;
- Bleed water—14% reported an increase while 39% reported a decrease;
- Setting time—51% reported an increase while 21% reported a decrease;
- Crusting—31% reported an increase while 1% reported a decrease;
- Changes in finishing—45% reported an increase while 3% reported a decrease; and
- Need for evaporation reducer—38% reported an increase while 1% reported a decrease.

Reported PLC concrete performance characteristics (relative to concrete produced using Type I portland cement) include:

- Plastic shrinkage cracking—43% reported an increase while 6% reported a decrease;
- Scaling—13% reported an increase while 1% reported a decrease;
- Dusting—13% reported an increase while 1% reported a decrease;

- Wear resistance—4% reported an increase while 19% reported a decrease; and
- Delamination—17% reported an increase while 1% reported a decrease.

### The Neuber Concrete Experience

Neuber Concrete, Phoenixville, PA, USA, was contracted to construct a 79,000 ft<sup>2</sup> (7340 m<sup>2</sup>) tilt-up building including a slab-on-ground, casting slabs, and wall panels. The ready mixed concrete producer indicated that Type IL cement was the only option. Because this was Neuber Concrete’s first experience with Type IL cement concrete, test slabs/mockups were used to evaluate the Type IL cement’s effects on finishing. Ultimately, seven mockups were made. The ready mixed concrete producer and cement supplier made site visits during the mockups and provided recommendations. Bleeding observations, estimates of evaporation rates, and quality of the finished surfaces were recorded. While we have found no other published data correlating bleed water, evaporation rates, and surface finish with Type IL cement concrete, the Neuber experiences are instructive.

### Mockup mixtures

The mixture ingredients and batch weights for the mockups are shown in Table 1. Mockup 1 had proportions of the typical concrete mixture used by Neuber Concrete. The mixture produced a slab that was good enough to use as a casting bed, but it was not up to the contractor’s standards for a slab-on-ground because the bleeding rate did not offset the

evaporation rate. The next five mockups were used to adjust the concrete mixture and initial curing methods to overcome this issue. For Mockup 7, the ready mixed concrete producer supplied concrete with a Type I cement.

As shown in Table 1, there were two attempts to increase the bleed water. The water content was increased by about 20 lb/yd<sup>3</sup> (12 kg/m<sup>3</sup>) for Mockup 5, and a coarser sand with a higher fineness modulus was used.

**Mockup parameters:** The seven mockups included two for tilt-up panels at 3.5 in. (90 mm) thick and five for slab-on-ground 7 to 8 in. (178 to 230 mm) thick. The quantity of concrete ranged from 16 to 40 yd<sup>3</sup> (12 to 30 m<sup>3</sup>), and the placement sizes varied from 600 to 3300 ft<sup>2</sup> (56 to 307 m<sup>2</sup>). The mockups were placed in May and June 2023. Table 2 provides a summary of the measured data and observations for the mockup placements.

**Fresh concrete properties:** Slump and air content were measured. Slumps ranged from 6.0 to 7.5 in. (152 to 190 mm), and air content ranged from 0.7 to 1.5%. Bleed water sheen was visually observed—none, little, or good. Fresh concrete properties are reported in Table 2.

**Environmental factors:** Table 2 summarizes the measured material and environmental conditions during concrete placements. Air and concrete temperature, relative humidity (RH), and wind speed were recorded. A Kestral Concrete Weather Pro 5200L was used to collect data and report evaporation rates on Mockups 4 and 5. The evaporation rate on the other mockups was calculated using the Uno equation provided in ACI 305R-20.<sup>6</sup>

**Table 1:**  
Specified properties and proportions of non-air-entrained mixtures used for mockup placements

Mixture properties and proportions	Mockup No.						
	1	2	3	4	5	6	7
Compressive strength, psi	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Design slump, in.	6.0 ± 1.0	7.0 ± 1.0	7.0 ± 1.0	6.0 ± 1.0	6.0 ± 1.0	6.0 ± 1.0	6.0 ± 1.0
Unit weight, lb/ft <sup>3</sup>	152.5	151.6	151.6	152.5	152.5	152.5	152.5
Steel fibers, lb/yd <sup>3</sup>	45	0	0	0	0	0	0
Cement type <sup>*</sup>	IL	IL	IL	IL	IL	IL	I
Cement, lb/yd <sup>3</sup>	530	620	620	530	530	620	530
Water, lb/yd <sup>3</sup>	265	283	283	265	275	283	265
w/cm	0.50	0.46	0.46	0.50	0.52	0.47	0.50
Maximum aggregate size, in.	1-1/2	1	1	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2
Coarse aggregate, lb/yd <sup>3</sup>	1684	1446	1520	1684	1684	1684	1684
Intermediate, No. 8, lb/yd <sup>3</sup>	400	346	240	400	400	400	400
Fine aggregate, lb/yd <sup>3</sup>	1224	1410	1385	1224	1224 <sup>†</sup>	1224 <sup>†</sup>	1224
Water-reducing admixture, fl oz/cwt	6	4	6	6	6	6	6

<sup>\*</sup>Cement mill certificates indicated limestone content and specific surface area (SSA) of 3.8% and 383 m<sup>2</sup>/kg for Type I cement and 13% and 488 m<sup>2</sup>/kg for Type IL cement

<sup>†</sup>Mockup 5 and 6 comprised a sand with a higher fineness modulus (coarser) than other mockups

Note: 100 psi = 0.7 MPa; 1 in. = 25 mm; 1 lb/ft<sup>3</sup> = 16 kg/m<sup>3</sup>; 1 lb/yd<sup>3</sup> = 0.6 kg/m<sup>3</sup>; 1 fl oz/100 lb = 65 mL/100 kg

**Placement and finishing:** All placements were executed using the following steps:

- Place—concrete was deposited directly from the chute of the concrete truck onto polyolefin sheeting;
- Strike off—concrete was leveled using a wheel-mounted, laser-guided screed;
- Wait—workers observed the concrete until bleed water and time of setting indicated finishing could commence;
- Float—concrete was worked using pans on a double-rider trowel machine; and
- Trowel—concrete was finished using combination blades on a double-rider trowel machine.

**Initial curing methods and evaluation:** No initial curing methods were used for the first three mockups, as this was not typically needed with Type I mixtures under the conditions at the time of placement. Because plastic shrinkage cracking, surface cracking, and crusting were observed on the first three mockups (even though evaporation rates were low), water misting and evaporation reducers were used on Mockups 4, 5, and 6. Table 3 provides the initial curing methods and the contractor’s evaluation of the results. Evaporation reducers are water-based emulsions that slow evaporation rates by forming monomer films and compensating to a small degree for water lost due to evaporation.

**Table 2:**  
Data for slab-on-ground (SOG) and tilt-up panel (Panel) mockups

Mixture properties	Measured data for mockup placements						
	1	2	3	4	5	6	7
Cement type	IL	IL	IL	IL	IL	IL	I
Placement date	5/10/23	5/15/23	5/19/23	6/5/23	6/8/23	6/16/23	6/29/23
Placement volume, yd <sup>3</sup>	40	40	16	30	36	34	20
Placement area, ft <sup>2</sup>	1890	3300	600	1400	1450	1421	1000
Placement thickness, in	7	3.5	3.5	7	7	8	7
Mockup type	SOG	Panel	Panel	SOG	SOG	SOG	SOG
<b>Environmental factors</b>							
Average air temperature, °F	65	61	63	65	55	61	72
Concrete temperature, °F	66	69	70	69	66	72	74
Average wind speed, mph	3	6	7	7	5	6	6
Average RH, %	60	54	57	50	57	80	66
Evaporation rate, lb/ft <sup>2</sup> /h	0.03 <sup>†</sup>	0.08 <sup>†</sup>	0.09 <sup>†</sup>	0.04 to 0.07 <sup>†</sup>	0.02 to 0.09 <sup>†</sup>	0.07 <sup>†</sup>	0.06 <sup>†</sup>
<b>Fresh concrete properties</b>							
Slump, in.	7.5	6.0	7.0	7.0	7.5	6.0	6.0
Air content, %	0.7	1.5	1.0	Not measured	1.1	1.3	1.5%
Bleed water sheen, visual	Little	None	None	None	Little	Little	Good
<b>Observations during and after finishing</b>							
Plastic shrinkage cracking	Yes	No	No	Yes	No	Yes	No
Surface tearing	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Surface cracking	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Crusting	No	Yes	Yes	Yes	Yes <sup>‡</sup>	Yes	No
Spotty setting	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Delamination	No	No	No	No	No	Yes	No
Contractor’s overall rating	OK <sup>§</sup>	Bad <sup>#</sup>	Bad <sup>#</sup>	Bad <sup>#</sup>	Bad	Repair needed	Great

<sup>†</sup>Evaporation rate calculated using the Uno equation provided in ACI 305R-20

<sup>‡</sup>Measured with Kestrel Concrete Weather Pro 5200L

<sup>‡</sup>Water comes up through cracks when troweled concrete surface is pushed down

<sup>§</sup>Good enough to use as a casting bed, not up to contractor standards for slab-on-ground

<sup>#</sup>Not good enough to use as a casting bed, removed and disposed off site

Note: 1 yd<sup>3</sup> = 0.8 m<sup>3</sup>; 1 ft<sup>2</sup> = 0.09 m<sup>2</sup>; 1 in. = 25 mm; °C = 5/9 × (°F – 32); 1 mph = 1.6 km/h; 1 lb/ft<sup>2</sup>/h = 4.9 kg/m<sup>2</sup>/h

**Table 3:**  
Initial curing methods and contractor evaluation

Mockup No.	Initial curing methods	Contractor evaluation
1	No misting or evaporation reducer used	Some bleed water Surface OK
2	No misting or evaporation reducer used	Crusting, spongy, surface tearing
3	No misting or evaporation reducer used	Soft, spongy with hard surface
4	Truck 1: Applied evaporation reducer directly from pan machine on first pass Truck 2: Applied evaporation reducer from backpack sprayer directly after laser screed	No bleed water on any surface Crusting and cracking
5	1/4 area—no water misting or evaporation reducer 1/4 area—misted directly after laser screed strike-off 1/2 area—applied evaporation reducer directly after laser screed	Small amount of bleed water Not as effective as evaporation reducer Surface water longer than other areas but crusted and cracked
6	Applied evaporation reducer directly after laser screed with a power drum sprayer	Soft, spongy, and cracking
7	No misting or evaporation reducer used	Good amount of bleed water Finished great

**Surface evaluation during finishing:** Figures 1, 2, and 3 show examples of plastic shrinkage cracking, surface tearing, and surface cracking observed on Mockups 4, 5, and 6. The occurrence of these issues and the contractor’s overall evaluation of the finishing are provided in Table 2. Crusting was evident in most of the Type II cement concrete mockups. The crusting was evident as water was pushed to the surface of the slab when finishers applied pressure on the slab. Only Mockup 7, the slab constructed with Type I cement, was given a good rating by the contractor.

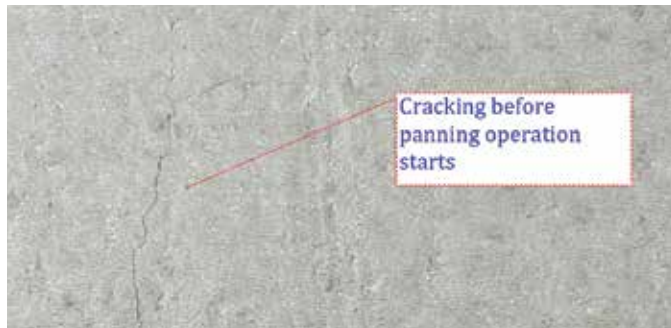
**Project construction:** The project was successfully constructed with Type I cement.

**Bleeding Rate and Capacity, Evaporation Rate, and Setting Time**

Poole<sup>5</sup> indicates that loss of water due to evaporation is particularly critical during the initial curing period. Under climatic conditions favorable to drying, evaporation of bleed water can be quite rapid. When evaporation exceeds bleeding, the near-surface zone of the cement paste dries, resulting in shrinkage and development of tensile strains. Because tensile strength at such early ages is very low, fresh concrete

develops plastic shrinkage cracks.

Thus, a finisher’s most critical objectives are accurately anticipating the evaporation-to-bleed water balance and taking adequate steps to shift that balance to a favorable position. Current guidance suggests either limiting the time concrete is left in an unprotected condition or limiting evaporation rates.



**Fig. 1: Plastic shrinkage cracking prior to finishing operations**



**Fig. 2: Surface tearing during troweling**



**Fig. 3: Surface cracking during troweling operation, concrete below surface is still plastic**

Neuber’s mockup information suggests a critical evaporation rate of about 0.05 lb/ft<sup>2</sup>/h (0.24 kg/m<sup>2</sup>/h)—identical to the allowable evaporation rate specified for silica fume concrete bridge deck overlays.<sup>6</sup> And Neuber’s experience relates to a comment from the ACI-ASCC Survey: “...have to use evaporation retarder [reducer], no matter the evaporation rate.” The use of an evaporation reducer, however, does not guarantee success. In the Neuber mockups, the application of an evaporation reducer did not result in adequate finishability or overall success.

**Critical points during construction:** Comparing bleeding behavior with probable drying conditions will identify potential critical periods prior to the time of initial setting. Figure 4 provides a hypothetical plot of evaporation and bleeding for a Type I cement concrete pavement placement.<sup>5</sup> For the first 1/2 hour, and again after about 4 hours, evaporation can exceed bleeding. The two periods, marked with red ovals, represent critical time periods for plastic shrinkage cracking. In the first critical period, the mixture will be plastic and can adjust to evaporative losses by shrinking into a thinner placement. However, cracking may occur during the second period because the concrete will have developed some stiffness and cannot adjust to the loss of water by simply reducing volume.

Figure 5 provides a hypothetical plot of evaporation and bleeding for Type I cement concrete pavement treated with an evaporation reducer shortly after strike-off.<sup>5</sup> The evaporation reducer shifts the cumulative evaporation curve, keeping the cumulative evaporation below the cumulative bleeding until final setting at 5 hours. This shift effectively eliminates any critical periods for plastic shrinkage cracking.

Figure 6 provides a hypothetical plot of evaporation and bleeding for a Type IL cement concrete slab placement treated with an evaporation reducer. Although the reducer shifts the cumulative evaporation curve, evaporation exceeds bleeding

throughout the initial curing period. Such a scenario would expose the fresh concrete to conditions suitable for crusting and plastic shrinkage cracking. Both outcomes were observed in the Neuber mockups.

**Bleeding rate and capacity:** Poole<sup>5</sup> reported that 12 in. (300 mm) pavements placed using concretes with a water-cementitious material ratio (*w/cm*) ranging from 0.38 to 0.48 had bleeding rates ranging from 0.03 to 0.06 lb/ft<sup>2</sup>/h (0.15 to 0.30 kg/m<sup>2</sup>/h). These rates are much lower than those observed in slab-on-ground concretes. For slab-on-ground

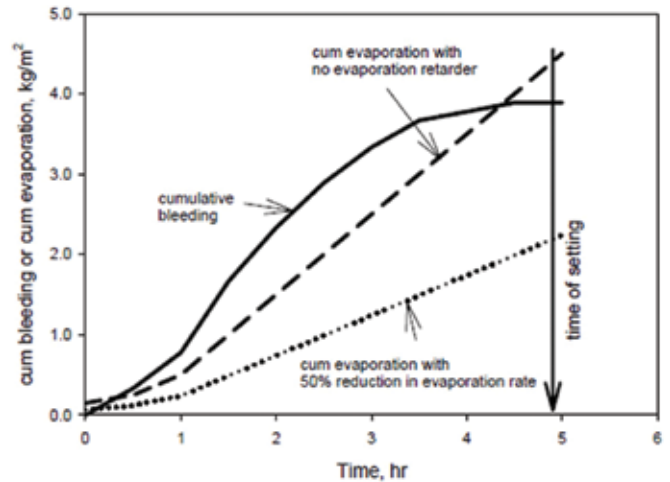


Fig. 5: Hypothetical plot of cumulative bleed and evaporation versus time for a concrete mixture prepared with Type I cement and finished using an evaporation reducer immediately after strike-off. By lowering cumulative evaporation, the surface treatment eliminates critical periods for plastic shrinkage cracking (after Reference 5)

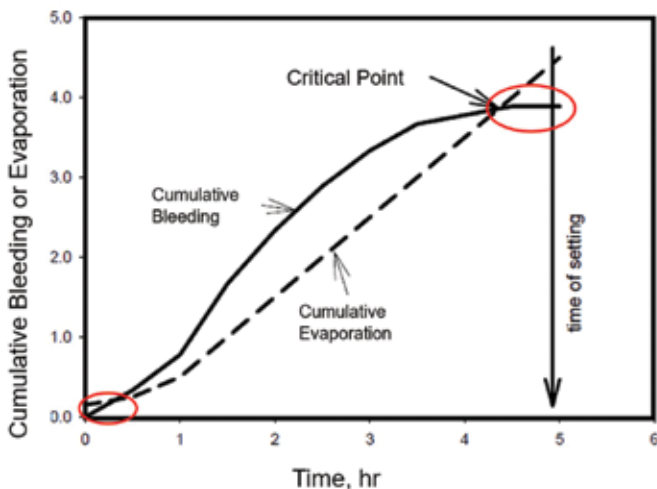


Fig. 4: Hypothetical plot of cumulative bleeding and evaporation versus time for a concrete mixture prepared with Type I portland cement. The red circles indicate critical periods in which evaporation exceeds bleeding (after Reference 5)

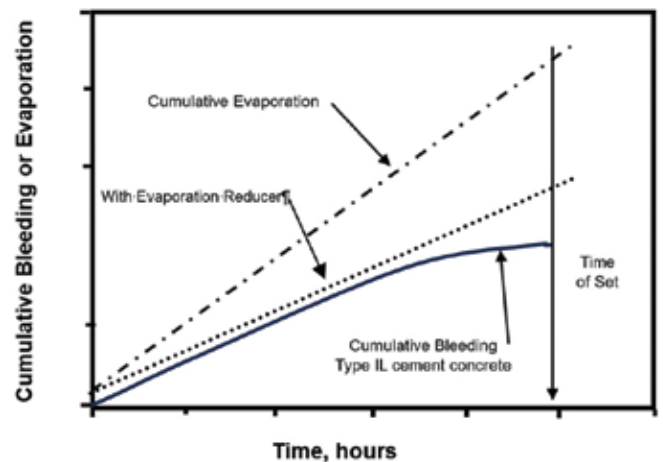


Fig. 6: Schematic plot of cumulative bleeding and evaporation versus time for a concrete mixture prepared with Type IL cement. Based on observations, the cumulative bleeding of PLC concrete is lower than the cumulative evaporation, even though a slab has been treated with an evaporation reducer. PLC concrete is therefore susceptible to plastic shrinkage cracking throughout the entire placement (after Reference 5)



placements for mixtures with  $w/cm$  ranging from 0.47 to 0.52, for example, bleeding rates of 0.10 to 0.30 lb/ft<sup>2</sup>/h (0.5 to 1.5 kg/m<sup>2</sup>/h) were observed for a 6 in. (150 mm) thick slab.<sup>7</sup> Thomas and Hooton,<sup>8</sup> for study 2, reported that the mixtures without supplementary cementitious materials (SCMs) showed reduced bleeding for PLC compared with ordinary portland cement (OPC). In some mixtures with SCMs, no bleed water was observed.

Figure 7 illustrates the bleeding capacity of concrete with  $w/cm = 0.50$  at a cement content of 350 kg/m<sup>3</sup> (600 lb/yd<sup>3</sup>).<sup>9</sup> Mixture C0 was produced with Type I portland cement, and Mixtures C10 and C20 were produced using PLC. The bleeding rates of the PLC mixtures were about half that of Mixture C0. Because the PLC mixtures essentially stopped bleeding hours prior to Mixture C0, the total bleed water for the PLC mixtures was about 75% of the total bleed water for the portland cement mixture.

Tennis et al.<sup>2</sup> verified that the bleeding rate is influenced primarily by the specific surface area (SSA) and not necessarily the amount of limestone in the cement (refer to Fig. 8). While the authors conclude that “In general, there appears to be no concern with bleeding for mixtures containing cements with limestone,”<sup>2</sup> they fail to emphasize the sensitivity of bleeding rate to SSA. For example, the SSA values for the Type I and Type II cements used in the Neuber mockup slabs (383 and 488 m<sup>2</sup>/kg, respectively) correlate with bleeding rates of  $7.3 \times 10^{-4}$  and  $17.8 \times 10^{-4}$  cm/min (Fig. 8). Reference 2 would therefore indicate that the bleeding rate

for the Type II cement is less than half the bleeding rate for Type I cement.

As previously noted, data for bleeding rate of PLC concretes used for slabs-on-ground is scarce. Contractors are currently requesting data from ready mixed concrete producers. Neuber requested bleed data for both the PLC and Type I cement mixtures. While bleed data was not available for the mockup mixtures, Fig. 8 shows a significant effect based on the cement fineness. Further, the ACI-ASCC Survey showed that 39% of the respondents observed less bleed water with PLC concrete than with Type I portland cement concrete.

**Evaporation rate:** ACI 305R-20 provides some advice on measuring evaporation rates. Many contractors, including Neuber, use Kestral weather stations that can calculate evaporation rates based on measurements of air temperature, RH, wind speed, and concrete temperature. It should be noted, however, that the provided rates are estimates based on a study of evaporation rates from a lake. Further, the estimates do not account for the significant effect of solar heat gain.<sup>6</sup>

**Setting time:** Many factors affect setting time. While the greater fineness of Type II cement relative to Type I cement can reduce the setting time, SCMs will decrease the setting time. The setting time must therefore be measured for any new combinations.

Time of initial setting is important because it indicates when bleeding is complete and final curing procedures can be initiated. However, the time of initial setting measured by ASTM C403/C403M,<sup>10</sup> at a penetration resistance of 500 psi,

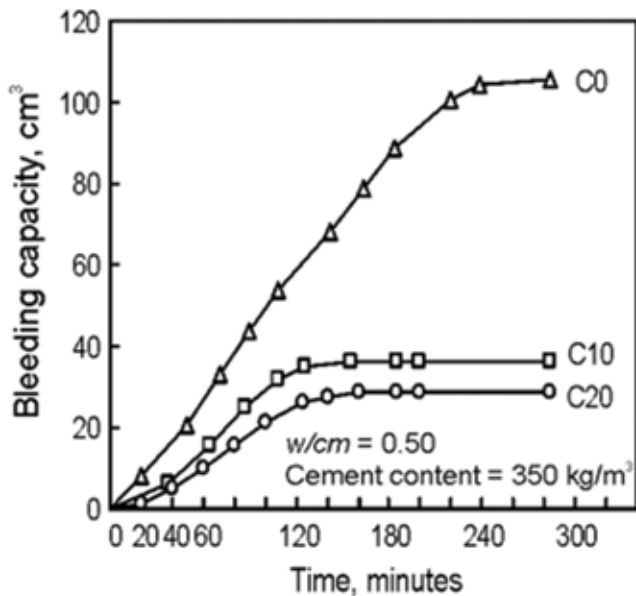


Fig. 7: Bleeding capacity of concrete with  $w/cm = 0.50$  at a cement content of 350 kg/m<sup>3</sup> (600 lb/yd<sup>3</sup>). One portland cement, C0, and two portland limestone cements, C10 and C20, were used.<sup>9</sup> Over the initial 120 minutes, the bleeding rates for concrete produced using C10 and C20 cements (with limestone) were about half the rate for concrete produced using C0 cement. Further, the bleeding capacity was reduced by about 75% (Note: 1 cm<sup>3</sup> = 0.06 in.<sup>3</sup>)

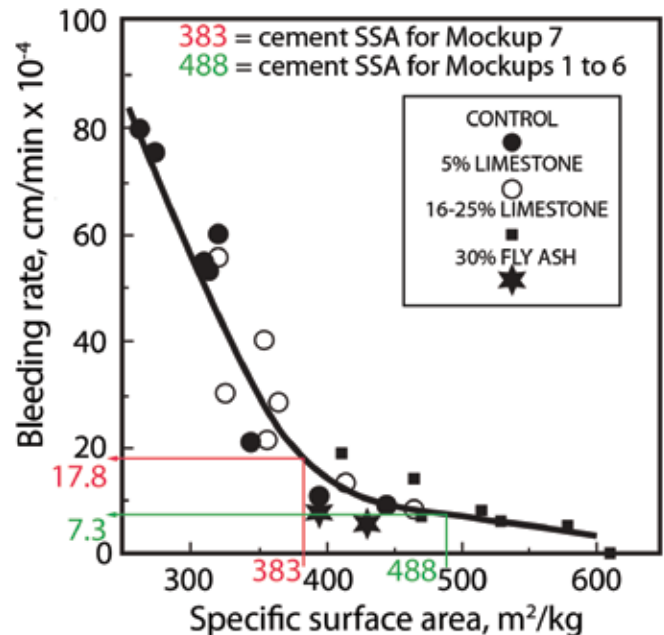


Fig. 8: The influence of specific surface area (SSA) of cementitious material on the bleeding rate (after Reference 2). We have indicated the SSA values (refer to Table 1) and associated bleeding rates for the cements used in the Neuber placements (Note: 1 cm/min = 0.4 in./min; 1 m<sup>2</sup>/kg = 4.9 ft<sup>2</sup>/lb)

is not the correct time to initiate final curing procedures. Bury et al.,<sup>11</sup> Suprenant and Malisch,<sup>12</sup> Lee and Hover,<sup>13</sup> and Dodson<sup>14</sup> showed that power floating should start at a penetration resistance of about 50 to 150 psi (0.3 to 1.0 MPa). Calorimetry per ASTM C1753/C1753M<sup>15</sup> can be used to estimate setting time, but the final curing time must be calibrated with the 50 to 150 psi penetration resistance.

## Application and Effectiveness of Evaporation Reducers

A major difference between concrete slabs-on-ground and most other concrete structures is the large surface area-to-volume ratio. This makes slabs-on-ground highly susceptible to environmental effects such as drying or temperature extremes. Compounding this is the relatively large amount of such concrete that can be placed in a single workday, resulting in a large surface area that must be managed without delay. For example, based on owners' demands for cost and schedule, the current slab placement for an industrial slab is 40,000 ft<sup>2</sup> (1700 m<sup>2</sup>) that is exposed to prevailing climatic conditions. As a matter of economics, this amount of surface area strongly affects choices for initial curing methods and materials.

**Access:** A 40,000 ft<sup>2</sup> industrial slab would be roughly 275 ft long by 150 ft wide (84 m long by 46 m wide). Such large areas will allow only limited access for initial curing during the 3 to 8 hours the fresh concrete will be exposed to the environment. Figure 4 shows the critical point when cumulative evaporation exceeds cumulative bleed, which is when power trowels are on the slab. Modern power trowels are equipped with containers capable of holding about 5 gal. (19 L) of evaporation reducer. Based on a typical manufacturer's recommended average application rate of 300 ft<sup>2</sup>/gal. (7.4 m<sup>2</sup>/L), a trowel will have enough reducer to cover about 1500 ft<sup>2</sup> (140 m<sup>2</sup>) of slab area. For concretes produced using Type I cement, application of evaporation reducer using power trowels has worked well.

Wheel-mounted, laser-guided screeds provide another opportunity for applying evaporation reducer. A commonly used laser screed carries a 16 gal. (61 L) capacity storage container that can apply evaporation reducer at a rate of 150 to 450 ft<sup>2</sup> (14 to 42 m<sup>2</sup>), and the screed can apply reducer only at the start of the placement.

**Multiple applications:** Water (in the form of mist) or evaporation reducers can be used to prevent excessive loss of bleed water. Water application generally faces no serious specification compliance issues and may be a reasonable option when evaporation rates are such that one or two passes by the application equipment are sufficient to protect the concrete. Poole<sup>16</sup> reports that for an application rate of 0.04 lb/ft<sup>2</sup>/h (0.20 kg/m<sup>2</sup>/h) and an evaporation rate of 0.20 lb/ft<sup>2</sup>/h (1.00 kg/m<sup>2</sup>/h), water would need to be applied every 12 minutes to avoid loss of mixing water.

Evaporation reducers are a very practical option for extending this period between required applications.

Depending on the conditions, multiple applications may be needed. Equation (1) yields a conservative estimate of the frequency of the application of an evaporation reducer for a given condition

$$F = \frac{AR}{ER(1-0.4) - BR} \quad (1)$$

where  $F$  is the frequency of application in hours;  $AR$  is the application rate;  $ER$  is the evaporation rate; and  $BR$  is the bleeding rate of concrete, with  $AR$ ,  $ER$ , and  $BR$  in lb/ft<sup>2</sup>/h or kg/m<sup>2</sup>/h.

The constant, 0.4, is taken to be the reduction in evaporation rate caused by an evaporation reducer. Most manufacturers claim at least a 50% reduction in evaporation rate, so this equation is probably conservative. A commonly recommended  $AR$  is 0.04 lb/ft<sup>2</sup> (0.2 kg/m<sup>2</sup>), also expressed as 200 ft<sup>2</sup>/gal. (5 m<sup>2</sup>/L), and this rate is near the maximum that can be applied practically without ponding or runoff.

**Effectiveness of evaporation reducers:** As there is no standard specification for evaporation reducers, contractors must follow manufacturer's guidelines. A review of 14 evaporation reducers listed in AIA MasterSpec 03000 cast-in-place concrete<sup>17</sup> indicates that nine provide data on the amount of moisture reduction. However, the data these manufacturers provided for reduction in moisture loss associated with wind (80% reduction) and sunlight (40% reduction) were the values originally reported by Cordon and Thorpe in 1965.<sup>18</sup>

Poole<sup>16</sup> investigated three evaporation reducers in a limited testing program. Mortars were prepared according to ASTM C156,<sup>19</sup> and evaporation reducers were applied at the manufacturer's recommended rate 200 ft<sup>2</sup>/gal. (5 m<sup>2</sup>/L) immediately after molding. The specimens were then placed in a walk-in environmental room at 100°F (38°C), 30% RH, with a fan directed on the surface at a speed of 6.7 mph (11 km/h). Specimens were weighed periodically, and evaporation rates were calculated. Control specimens had no evaporation reducer applied. The test ran for 2.5 hours.

Cordon and Thorpe<sup>18</sup> tested evaporation reducers in either wind or sunlight but not in combination. Poole<sup>16</sup> tested evaporation reducers with air temperature, RH, and wind—anticipated weather conditions in the field. Poole's test values are lower than those observed by Thorpe and Cordon, which is understandable due to the different environmental conditions. What is not understandable, however, is the range of the test results—23, 44, and 65% reduction in moisture (Table 4). In other words, not all evaporation reducers are equal. The best product was found to be two to three times better than the other two products. These are disturbing results for concrete contractors using evaporation reducers to minimize plastic shrinkage cracking and surface crusting. Some contractors indicate that water misting works better using an evaporation reducer—a plausible conclusion if the evaporation reducer they evaluated provided a low reduction in moisture.

From Poole's limited investigation,<sup>16</sup> it appears as though

**Table 4:**  
**Effect of evaporation reducers on evaporation of bleed water from mortar specimens**

Evaporation reducer	Mass loss, kg/m <sup>2</sup> /h		Evaporation reduction, %
	With evaporation reducer	Control	
Product A	0.58	0.75	23
Product B	0.49	0.88	44
Product C	0.42	1.19	65

Note: 1 kg/m<sup>2</sup>/h = 0.2 lb/ft<sup>2</sup>/h

protecting concrete during the period between placing and applying final curing using evaporation reducers might require repeated applications, depending on conditions. This would particularly apply if the time of initial setting was several hours after placement, which occurs for slabs to receive a trowel finish.

The limited test results presented herein suggest a wide variation in performance among products. These products are in common use and potentially have a role to play in minimizing early drying problems for PLC concretes. Although the use of an evaporation reducer did not prove effective in the Neuber mockups produced using Type IL cement, it is clear that the industry needs to develop test methods and a specification for evaporation reducers.

### Best Practices and Strategies to Minimize Slab Finishing Challenges

The following recommended processes, even though they don't guarantee success as the Neuber mockups illustrate, provide the best solution to minimize slab finishing challenges:

- During the trial batch process, acquire data from a bleed test in accordance with ASTM C232/C232M<sup>20</sup> and a setting time test in accordance with ASTM C403/C403M. For ASTM C232/C232M, obtain the bleeding rate and the accumulated volume of bleed water versus elapsed time. For ASTM C403/C403M, obtain the setting time for 150 psi penetration resistance. This information is needed to develop an initial curing plan for the mockup;
- Based on the anticipated weather, develop an initial curing plan using bleeding and setting time data. Evaluate options for access and techniques for spraying multiple applications of evaporation reducer. Use this plan on the mockup;
- Perform a mockup using the anticipated tools and techniques, and incorporate the initial curing plan. Some Type IL cement concrete mixtures are sensitive to environmental changes, so there is a need for mockups representing both cold (50°F [10°C]) and hot (90°F [32°C]) weather. Adjust the plan based on the mockup, and, if necessary, perform another mockup; and

- Because trial batch data and mockup information might not be available until after the contract is awarded, qualify bid proposals based on anticipated timing of finishing and initial curing. If the planned construction operations require more time, the concrete mixture needs to be adjusted to achieve desired bleeding and setting time, or the anticipated initial curing plan changes, a change order would be appropriate to cover the added costs.

### Early-Age, Strength-Critical Concrete Challenges

Construction operations, and thus cost and schedule, are highly dependent on early-age concrete strength. Compressive strength requirements are specified for cold-weather protection (500 psi before first freeze and 3500 psi before multiple freezing-and-thawing cycles per ACI 306R-1621), stressing post-tensioning (2500 psi per ACI CODE-318-(19)22<sup>22</sup>, and form removal (75%  $f'_c$  per ACI 347R-14(21)).<sup>23</sup> Saw-cut joint timing is also correlated with compressive strength, depending on the aggregate type, ranging from 500 to 1000 psi.<sup>24</sup> Thus, any reduction in strength or delay in early-age strength gain can dramatically affect construction cost and schedule.

The recent Joint ACI-ASCC Survey on PLC Concrete posed questions to elicit user experiences with the performance of early-age concrete in various strength-critical construction operations. The percentages reported as follows represent the answers from 173 respondents. According to the survey, construction operations have been affected by difficulties in achieving early-age strength for PLC concrete.

The following construction operations were influenced by the early-age PLC concrete strength:

- Cold weather protection—49% reported changes;
- Post-tensioning—11% reported delays;
- Form removal—18% reported delays;
- Saw-cut joints—70% reported changes in timing; and
- Compressive strength—30% reported decrease at 3 days while 40% reported decrease at 7 days.

**Cold weather protection:** Risks include early freezing before concrete reaches 500 psi and multiple freezing-and-thawing cycles before concrete reaches 3500 psi (24 MPa). Low or delayed early-age strength increases the length of cold weather protection, increasing costs and delaying schedule.

**Saw-cut joints:** Risks include early sawing that causes joint raveling (Fig. 9) and late sawing that causes the concrete to crack outside the joint (Fig. 10). Joint raveling makes it more difficult to fill joints, and the raveled edges may create an undesirable aesthetic. Cracking outside the joint may lead to crack repair or diminished load transfer. Figure 11<sup>25</sup> illustrates the sawing window for which contractors may need to adjust for some Type IL cement concrete slabs. ACI-ASCC Survey comments include: (a) "Some have seen cracking before early entry sawcuts could be cut," (b) "Intermittent setting and unpredictable set times of the concrete made timing the sawcuts difficult. Material sets faster in hot weather



and slower in cold weather than equivalent I/II cement,” and (c) “There is a need to be very strict about timing for sawcuts.”

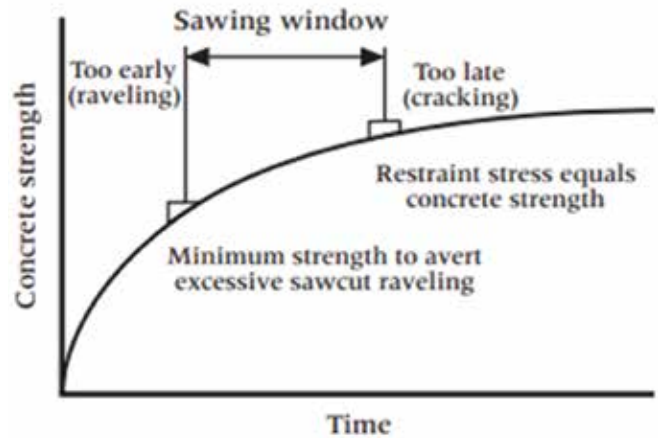
**Stressing post-tensioning:** Risks include slab blowouts when stressing and cracking prior to stressing, both due to low strength. On one project, the ready mixed concrete producer told the contractor to use the same maturity curve for Type IL cement concrete as that developed for Type I cement concrete. As Fig. 12 illustrates, the maturity curve for Type I cement over predicted the strength for Type IL, resulting in slab blowouts during stressing; ACI-ASCC Survey comment: “Issue with accuracy of maturity meter readings at early stages of curing of air-entrained mixes with IL cement.

Maturity meter readings overpredicted strength. Resulted in PT anchor blowouts. Utilized Windsor probes to assist in determination of concrete strength.”

**Form removal:** Risks include cracking and increased deflection due to early form removal when concrete strength is low, and increased cost and schedule for delayed form removal due to low strength; ACI-ASCC Survey comment: “The last three (cold weather, stressing, and form removal) are most problematic and uniform across the Type IL footprint...reduced 18 hr to 36 hr strengths resulting in delayed post tensioning, form removal, and construction time.”



**Fig. 9: Saw cutting too early results in raveled joint edges** (photo courtesy of Scott Metzger, Metzger/McGuire)



**Fig. 11: The sawing window for some Type IL cement concrete slabs is very sensitive to the environment, making it difficult to avoid raveling or cracking<sup>25</sup>**



**Fig. 10: Saw cutting too late results in cracking** (photo courtesy of Scott Metzger, Metzger/McGuire)



**Fig. 12: Tendons in a concrete slab constructed with Type IL concrete were stressed based on a maturity calibration for Type I cement concrete. The strength of the Type IL cement concrete was overestimated, resulting in slab blowouts**

## Minimizing Early-Age Strength Challenges

Recommended best practices and strategies to minimize early-age strength challenges include:

- Develop a new trial batch for each Type II cement concrete mixture, measuring early-age strength at 1, 3, and 7 days. Alternatively, develop a maturity curve on the trial batch in accordance with ASTM C1074.<sup>26</sup> Prior to performing strength-critical operations, such as formwork removal or post-tensioning, ASTM C1074 requires supplementing determination of concrete maturity with other tests;
- Ensure saw cuts are incorporated into slab mockups. Some Type II cement concrete mixtures are sensitive to environmental changes, resulting in the need for mockups representing both cold (50°F) and hot (90°F) weather; and
- Because trial batch data and mockup information might not be available until after contract award, qualify bid proposals based on anticipated timing of cold weather protection, stressing post-tensioning tendons, and form removal. If the planned construction operations require more time or if the concrete mixture needs to be adjusted to achieve desired early-age strengths, a change order would be appropriate to cover these costs.

## References

1. Smartz, B.W.; Laker, T.S.; and Van Dam, T., "Performance and Sustainability," *Concrete International*, V. 35, No. 9, Sept. 2013, pp. 39-43.
2. Tennis, P.D.; Thomas, M.D.A.; and Weiss, W.J., "State-of-the-Art Report on Use of Limestone in Cements at Levels of up to 15%," SN3148, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2011, 78 pp.
3. Hossack, A.; Thomas, M.D.A.; Barcelo, L.; Blair, B.; and Delagrave, A., "Performance of Portland Limestone Cement Concrete Pavements," *Concrete International*, V. 36, No. 1, Jan. 2014, pp. 40-45.
4. Thomas, M.D.A.; Hooton, R.D.; Cail, K.; Smith, B.A.; de Wal, J.; and Kazanis, K.G., "Field Trials of Concrete Produced with Portland Limestone Cement," *Concrete International*, V. 32, No. 1, Jan. 2010, pp. 35-41.
5. Poole, T.S., "Guide for Curing Portland Cement Concrete Pavements, Volume I," Report No. FHWA-RD-02-099, Federal Highway Administration, McLean, VA, Jan. 2005, 49 pp.
6. ACI Committee 305, "Guide to Hot Weather Concreting (ACI 305R-20)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 28 pp.
7. "Plastic Shrinkage Cracking in Concrete," *Engineering Information*, National Ready-Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, July 1960, 2 pp.
8. Thomas, M.D.A., and Hooton, R. D., "The Durability of Concrete Produced with Portland-Limestone Cement: Canadian Studies," R&D SN3142, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2010, 28 pp.
9. Irassar, E.F.; Bonavetti, V.L.; Menendez, G.; Donza, H.; and Cabera, O., "Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with Portland Limestone Cement," *Third Canmet/ACI International Symposium: Sustainable Development and Concrete*, SP-202, V.M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, 2001, pp. 431-450.

# Anyone. Anytime. Anywhere.

Instantly Verify  
an individual's  
ACI Certification.  
Download the ACI  
Certification Verify App now!



To learn more or download  
the Verify App, visit  
[concrete.org/verify](https://concrete.org/verify).



10. ASTM C403/C403M-23, "Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 6 pp.
11. Bury, M.A.; Bury, J.R.; and Martin, D., "Testing Effects of New Admixtures on Concrete Finishing," *Concrete International*, V. 16, No. 1, Jan. 1994, pp. 26-31.
12. Suprenant, B.A., and Malisch, W.R., "Diagnosing Slab Delaminations," *Concrete Construction*, V. 43, No. 1, Jan. 1998, pp. 29-35.
13. Lee, C.H., and Hover, K.C., "What Do We Mean by 'Setting?'" *Concrete International*, V. 38, No. 8, Aug. 2016, pp. 53-59.
14. Dodson, V.H., "Chapter 11—Time of Setting," *Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP 169C, P. Klieger and J.F. Larmond, eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 1994, 623 pp.
15. ASTM C1753/C1753M-21a, "Standard Practice for Evaluating Early Hydration of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Thermal Measurements," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, 19 pp.
16. Poole, T.S., "Curing Portland Cement Concrete Pavements, Volume II," Report No. FHWA-HRT-05-038, Federal Highway Administration, McLean, VA, Aug. 2006, 170 pp.
17. AIA MasterSpec, Cast-in-Place Concrete (Section 033000), Deltek, Herndon, VA, 2021, 33 pp.
18. Cordon, W.A., and Thorpe, J.D., "Control of Rapid Drying of Fresh Concrete by Evaporation Control," *ACI Journal Proceedings*, V. 62, No. 8, Aug. 1965, pp. 987-986.
19. ASTM C156, "Standard Test Method for Water Loss [from a Mortar Specimen] Through Liquid Membrane-Forming Curing Compounds for Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 5 pp.
20. ASTM C232/C232M-21, "Standard Test Methods for Bleeding of Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, 3 pp.
21. ACI Committee 306, "Guide to Cold Weather Concreting (ACI 306R-16)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2016, 24 pp.
22. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI CODE-318-19) (Reapproved 2022)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 624 pp.
23. ACI Committee 347, "Guide to Formwork for Concrete (ACI 347R-14) (Reapproved 2021)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 36 pp.
24. Okamoto, P. A.; Nussbaum, P.J.; Smith, K.D.; Darter, M.I.; Wilson, T.P.; Wu, C.L.; and Tayabji, S.D., "Guidelines for Timing Contraction Joint Sawing and Earliest Loading for Concrete Pavements, Volume I," Report No. FHWA-RD-91-079, Federal Highway Administration, Washington, DC, 1994, 227 pp.
25. "CPTP TechBrief: Early-Entry Sawing of Portland Cement Concrete Pavements," FHWA-HIF-07-031, Federal Highway Administration, Washington, DC, June 2007, 6 pp.
26. ASTM C1074-19, "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 11 pp.

Selected for reader interest by the editors.



ACI member **James Klingler** is a Concrete Construction Specialist for the American Society of Concrete Contractors (ASCC), St. Louis, MO, USA. He is a member of ACI Committees 134, Concrete Constructability, and 318, Structural Concrete Building Code; ACI Subcommittee 318-A, General, Concrete, and Construction; and Joint ACI-ASCC Committee 117, Tolerances. He was the recipient of the 2020 ACI Construction Award and the 2022 ACI Roger H. Corbetta Concrete Constructor Award. Klingler received his master's degree in structural engineering from the University of Maryland, College Park, MD, USA.



**Joseph F. Neuber Jr.**, FACI, is founder of the Neuber Group of Companies. He holds patents on methods and devices for floor construction, has authored numerous articles in *Concrete International* and other industry publications, and has conducted multiple seminars at World of Concrete and other industry events. Neuber is past Chair of ACI Committee 302, Construction of Concrete Floors, and he is a member of ACI Committee 360, Design of Slabs on Ground.



**Jeffrey Ondo** is a Project Manager for Neuber Concrete. His specialty is slab-on-ground and tilt-wall construction. Since 1990, he has placed over 25 million ft<sup>2</sup> (2.3 million m<sup>2</sup>) of commercial and industrial concrete floors. He has been trained by some of the best flooring contractors in the United States while gaining additional knowledge from ACI and Tilt-Up Concrete Association (TCA) members. His experience continues to grow as the concrete industry evolves to new heights.



**Bruce A. Suprenant**, FACI, is Chair of ACI Subcommittee 117-M, Movements Affecting Tolerances, and Vice Chair of Joint ACI-ASCC Committee 117, Tolerances, as well as a member of ACI Committees 134, Concrete Constructability; and 302, Construction of Concrete Floors. His honors include the 2022 ACI *Concrete International* Award, the 2021 ACI Arthur R. Anderson Medal, the 2020 ACI Construction Award, the 2013 ACI Certification Award, the 2010 ACI Roger H. Corbetta Concrete Constructor Award, and the 2010 ACI Construction Award.



# Minimizando el riesgo de Losas de hormigón con Cemento Portland–Caliza

*Mejores prácticas y estrategias para reducir los desafíos del acabado de losas de piso y resistencias críticas a edades tempranas.*

por James Klingler, Joseph F. Neuber Jr., Jeffrey Ondo y Bruce A. Suprenant

Si bien muchos contratistas han colocado y finalizado losas de concreto construidas con cemento Tipo IL (cemento de piedra caliza - Portland PLC), otros han tenido problemas con retrasos en el proyecto y acabados inaceptables.

Para encontrar las causas fundamentales de los resultados fallidos, se deben evaluar los datos del lugar de trabajo, como las proporciones de la mezcla, las condiciones climáticas, las prácticas y equipos de construcción y los requisitos de acabado.

Este artículo analiza a edad temprana, operaciones de construcción críticas como corte con sierra, protección contra el clima frío, postensado y remoción de encofrados, así como las mejores prácticas y estrategias para minimizar los riesgos durante el acabado de losas de piso, y la construcción temprana y de resistencia crítica. Este artículo también proporciona datos recopilados sobre seis prototipos construidos con cemento Tipo IL y uno construido con cemento Tipo I.

Los autores alientan a otros a compartir sus datos y experiencias con el cemento Tipo IL.

## Desafíos del acabado del hormigón

Los resultados de la colocación de losas de concreto dependen en gran medida de los componentes de la mezcla y de las propiedades del concreto fresco, como el asentamiento, el contenido de aire, la tasa de sangrado y el tiempo de fraguado. La sensibilidad del concreto fresco al medio ambiente impacta las técnicas y el tiempo del acabado para producir un producto de calidad. Un factor importante que separa las losas que requieren un acabado con llana de las losas diseñadas como pavimento<sup>1-4</sup> es el tiempo que la losa de concreto fresco está expuesta al

medio ambiente. Para el pavimento de encofrado deslizante, Poole<sup>5</sup> indicó que el acabado final generalmente se completa a los pocos minutos de colocar el concreto, mucho antes del momento del fraguado inicial y del final del período de sangrado. Para las losas que reciben un acabado con llana, el acabado final puede ocurrir de 3 a 8 horas después de su colocación, y los retrasos más prolongados ocurren en climas fríos con alta humedad relativa. Este tiempo de exposición prolongado plantea un riesgo sustancial para los contratistas que tienen la tarea de convertir una pieza sensible y producto perecedero en un producto endurecido de calidad para el propietario. Por lo tanto, los ejemplos de pavimentos de encofrado deslizante y estacionamientos no son comparables a las losas especificadas para recibir un acabado con llana.

## Encuesta sobre hormigón PLC

La reciente encuesta conjunta ACIASCC sobre hormigón PLC (se publicará en la edición de febrero de 2024 de Concrete International) planteó preguntas para obtener experiencias de los usuarios con el acabado y el rendimiento de las losas que requieren un acabado con llana.

En la siguiente sección se presentan las respuestas de 173 encuestados. Como muestra el estudio, las propiedades del hormigón fresco cambiaron cuando cambió el cemento.

Los cambios reportados en las propiedades del concreto fresco asociados con el cambio del cemento Tipo I al cemento Tipo IL incluyen:

- Demanda de agua: el 77% informó un aumento mientras que el 7% informó una disminución;
- Sangrado: el 14 % informó un aumento mientras que el 39 % informó una disminución;

- Tiempo de fraguado: el 51 % informó un aumento mientras que el 21 % informó una disminución;
- Formación de costras: el 31 % informó un aumento, mientras que el 1 % informó un disminuir;
- Cambios en el acabado: el 45 % informó un aumento mientras que el 3 % informó una disminución;
- y
- Necesidad de reductor de evaporación: el 38% informó un aumento mientras que el 1% reportó una disminución.

Las características de rendimiento del concreto PLC informadas (en relación con el concreto producido con cemento Portland Tipo I) incluyen:

- Agrietamiento por retracción plástica: el 43 % informó un aumento mientras que el 6% reportó una disminución;
- Descascaramiento: el 13 % informó un aumento mientras que el 1 % informó un disminuir;
- Polvo: el 13 % informó un aumento, mientras que el 1 % informó un disminuir;
- Resistencia al desgaste: el 4 % informó un aumento mientras que el 19 % informó una disminución;
- y
- Delaminación: el 17 % informó un aumento mientras que el 1 % informó una disminución.

## La experiencia del hormigón de Neuber

Se contrató a Neuber Concrete, Phoenixville, PA, EE. UU., para construir un edificio con muros *tilt-up* de 79,000 pies<sup>2</sup> (7,340 m<sup>2</sup>) que incluye una losa sobre el suelo, losas de fundición y paneles de pared. El productor de concreto premezclado indicó que el cemento Tipo IL era la única opción. Debido a que esta fue la primera experiencia de Neuber Concrete con concreto de cemento Tipo IL, se utilizaron losas/prototipos de prueba para evaluar los efectos del cemento Tipo IL en el acabado. Al final se hicieron siete prototipos. El productor de concreto premezclado y el proveedor de cemento realizaron visitas al sitio durante los prototipos y brindaron recomendaciones. Se registraron observaciones de sangrado, estimaciones de tasas de evaporación y calidad de las superficies acabadas. Si bien no hemos encontrado otros datos publicados que correlacionen el agua de sangrado, las tasas de evaporación y el acabado superficial con concreto de cemento Tipo IL, las experiencias de Neuber son instructivas.

**Tabla 1:**

**Propiedades y proporciones especificadas de mezclas sin aire incorporado utilizadas para la colocación de prototipos.**

Propiedades y proporciones de la mezcla.	No. de Prototipo						
	1	2	3	4	5	6	7
Resistencia a la compresión, psi	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Revenimiento, in.	6.0 ± 1.0	7.0 ± 1.0	7.0 ± 1.0	6.0 ± 1.0	6.0 ± 1.0	6.0 ± 1.0	6.0 ± 1.0
Peso unitario, lb/ft <sup>3</sup>	152.5	151.6	151.6	152.5	152.5	152.5	152.5
Fibras de acero, lb/yd <sup>3</sup>	45	0	0	0	0	0	0
Tipo de cemento*	IL	IL	IL	IL	IL	IL	I
Cemento tipo, lb/yd <sup>3</sup>	530	620	620	530	530	620	530
Agua, lb/yd <sup>3</sup>	265	283	283	265	275	283	265
w/cm	0.50	0.46	0.46	0.50	0.52	0.47	0.50
Tamaño máximo de agregado, pulg.	1-1/2	1	1	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2
Agregado grueso, lb/yd <sup>3</sup>	1684	1446	1520	1684	1684	1684	1684
Intermedio, No. 8, lb/yd <sup>3</sup>	400	346	240	400	400	400	400
Agregado fino, lb/yd <sup>3</sup>	1224	1410	1385	1224	1224 <sup>†</sup>	1224 <sup>†</sup>	1224
Aditivo reductor de agua, fl oz/cwt	6	4	6	6	6	6	6

\*\*Los certificados de molienda de cemento indicaron un contenido de piedra caliza y una superficie específica (SSA) de 3,8% y 383 m<sup>2</sup>/kg para el cemento Tipo I y 13% y 488 m<sup>2</sup>/kg para el cemento Tipo IL

<sup>†</sup>Los prototipos 5 y 6 comprendían una arena con un módulo de finura más alto (más tosco) que otros prototipos

Nota: 100 psi = 0.7 MPa; 1 in. = 25 mm; 1 lb/ft<sup>3</sup> = 16 kg/m<sup>3</sup>; 1 lb/yd<sup>3</sup> = 0.6 kg/m<sup>3</sup>; 1 fl oz/100 lb = 65 mL/100 kg



## Mezclas de prototipos

Los ingredientes de la mezcla y los pesos de los lotes para los prototipos se muestran en la Tabla 1. El prototipo 1 tenía proporciones de la mezcla de concreto típica utilizada por Neuber Concrete. La mezcla produjo una losa que era lo suficientemente buena para usar como lecho de fundición, pero no cumplía con los estándares del contratista para una losa sobre suelo porque la tasa de sangrado no compensaba la tasa de evaporación. Los siguientes cinco prototipos se utilizaron para ajustar la mezcla de concreto y los métodos de curado iniciales para superar este problema. Para el prototipo 7, el productor de concreto premezclado suministró concreto con cemento Tipo I.

Como se muestra en la Tabla 1, hubo dos intentos de aumentar el agua de sangrado. El contenido de agua se incrementó en aproximadamente 20 lb/yd<sup>3</sup> (12 kg/m<sup>3</sup>) para el prototipo 5 y se usó una arena más gruesa con un módulo de finura más alto.

**Parámetros del prototipo:** Los siete prototipos incluían dos para paneles inclinables (*tilt-up*) de 3,5 pulgadas (90 mm) de espesor y cinco para losas sobre suelo de 7 a 8 pulgadas (178 a 230 mm) de espesor. La cantidad de concreto varió de 16 a 40 yd<sup>3</sup> (12 a 30 m<sup>3</sup>), y los tamaños de colocación variaron de 600 a 3,300 ft<sup>2</sup> (56 a 307 m<sup>2</sup>). Los prototipos se colocaron en mayo y junio de 2023. La Tabla 2 proporciona un resumen de los datos medidos y las observaciones de las ubicaciones de los prototipos.

**Tabla 2:**

**Datos para prototipos de losa sobre suelo (SOG) y panel inclinable/tilt-up (Panel)**

Propiedades de la mezcla	Datos medidos para ubicaciones de prototipo						
	1	2	3	4	5	6	7
Tipo de cemento	IL	IL	IL	IL	IL	IL	I
Fecha de colocación	5/10/23	5/15/23	5/19/23	6/5/23	6/8/23	6/16/23	6/29/23
Volumen de colocación, yd <sup>3</sup>	40	40	16	30	36	34	20
Área de colocación, pies <sup>2</sup>	1890	3300	600	1400	1450	1421	1000
Espesor de colocación, in.	7	3.5	3.5	7	7	8	7
Tipo de prototipo	SOG	Panel	Panel	SOG	SOG	SOG	SOG
<b>Factores ambientales</b>							
Temperatura media del aire, °F	65	61	63	65	55	61	72
Temperatura del hormigón, °F	66	69	70	69	66	72	74
Velocidad media del viento, mph	3	6	7	7	5	6	6
HR promedio, %	60	54	57	50	57	80	66
Tasa de evaporación, lb/pie <sup>2</sup> /h	0.03*	0.08*	0.09*	0.04 a 0.07†	0.02 a 0.09†	0.07*	0.06*
<b>Propiedades del hormigón fresco</b>							
Caída, in.	7.5	6.0	7.0	7.0	7.5	6.0	6.0
Contenido de aire, %	0.7	1.5	1.0	No medido	1.1	1.3	1.5%
Brillo del agua de sangrado, visual	Pequeño	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Pequeño	Pequeño	Bien
<b>Observaciones durante y después de terminar</b>							
Agrietamiento por contracción plástica	Sí	No	No	Sí	No	Sí	No
Desgarro superficial	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Grietas superficiales	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Formación de Costras	No	Sí	Sí	Sí	Sí‡	Sí	No
Fraguado irregular	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Delaminación	No	No	No	No	No	Sí	No
Calificación general del contratista	De acuerdo§	Malo#	Malo#	Malo#	Malo	Reparación necesaria	Excelente

\*Tasa de evaporación calculada utilizando la ecuación de Uno proporcionada en ACI 305R20

†Medido con Kestrel Concrete Weather Pro 5200L

‡El agua sale a través de las grietas cuando se empuja hacia abajo la superficie de concreto aplicada con llana.

§Suficientemente bueno para usar como lecho de fundición, no cumple con los estándares del contratista para losa sobre suelo.

#No es lo suficientemente bueno para usarlo como lecho de fundición, se retira y se desecha fuera del sitio

Nota: 1 yd<sup>3</sup> = 0.8 m<sup>3</sup>; 1 ft<sup>2</sup> = 0.09 m<sup>2</sup>; 1 in. = 25 mm; °C = 5/9 × (°F - 32); 1 mph = 1.6 km/h; 1 lb/ft<sup>2</sup>/h = 4.9 kg/m<sup>2</sup>/h

**Tabla 3:****Métodos de curado inicial y evaluación del contratista.**

No. de Prototipo	Métodos de curado inicial.	Evaluación de contratistas
1	No se utiliza nebulización o reductor de evaporación	Un poco de agua de sangrado Superficie correcta
2	No se utiliza nebulización o reductor de evaporación	Costra, esponjosa, desgarre superficial
3	No se utiliza nebulización o reductor de evaporación	Suave, esponjoso con superficie dura
4	Camión 1: Reductor de evaporación aplicado directamente desde la allanadora en la primera pasada Camión 2: Reductor de evaporación aplicado desde el pulverizador de mochila directamente después de la regla láser	No hay sangrado Formación de costras y grietas
5	1/4 de área—sin nebulización de agua ni reductor de evaporación 1/4 de área—nebulizada directamente después del enrasado de la regla láser 1/2 de área—reductor de evaporación aplicado directamente después de la regla láser	Pequeña cantidad de agua de sangrado No es tan efectivo como el reductor de evaporación El agua de sangrado dura más que otras áreas pero tiene costras y grietas
6	Reductor de evaporación aplicado directamente después de la regla láser con un pulverizador de tambor eléctrico	Suave, esponjoso y agrietado
7	No se utiliza reductor de nebulización o evaporación	Buena cantidad de agua de sangrado Buen acabado

**Propiedades del hormigón fresco:** Se midieron el revenimiento y el contenido de aire. Los revenimientos variaron de 6.0 a 7.5 pulgadas (152 a 190 mm) y el contenido de aire varió de 0.7 a 1.5%. Se observó visualmente el brillo del agua de sangrado: ninguno, poco o bueno. Las propiedades del concreto fresco se reportan en la Tabla 2.

**Factores ambientales:** La Tabla 2 resume los valores medidos de condiciones de materiales y ambientales durante la colocación del hormigón. Se registraron la temperatura del aire y del hormigón, la humedad relativa (RH) y la velocidad del viento. Se utilizó un Kestral Concrete Weather Pro 5200L para recopilar datos e informar las tasas de evaporación en los prototipos 4 y 5. La tasa de evaporación en los otros prototipos se calculó utilizando la ecuación de Uno proporcionada en ACI 305R20<sup>6</sup>.

**Colocación y acabado:** Se ejecutaron todas las colocaciones utilizando los siguientes pasos:

- Lugar: el concreto se depositó directamente desde el conducto del camión de concreto sobre láminas de poliolefina;
- Enrasado: el concreto se niveló usando una regla enrasadora guiada por láser montada sobre rueda;
- Espera: los trabajadores observaron el concreto hasta que el agua de sangrado y el tiempo de fraguado indicaron que podía comenzar el acabado;
- Flotación: el concreto se trabajó usando una allanadora de dos aspas; y
- Llana: el concreto se terminó usando hojas combinadas en una alisadora de doble operador.

**Métodos de curado inicial y evaluación:** No se utilizaron métodos de curado inicial para los tres primeros prototipos, ya que esto normalmente no era necesario con mezclas Tipo I bajo las condiciones en el momento de la colocación. Debido a que se observaron grietas por contracción plástica, grietas en la superficie y formación de costras en los primeros tres prototipos (aunque las tasas de evaporación fueron bajas), se utilizaron nebulización de agua y reductores de evaporación en los prototipos 4, 5 y 6. La Tabla 3 proporciona los métodos de curado iniciales y la evaluación de los resultados por parte del contratista. Los reductores de evaporación son emulsiones a base de agua que reducen las tasas de evaporación formando películas de monómero y compensando en pequeña medida la pérdida de agua debido a la evaporación.

**Evaluación de la superficie durante el acabado:** Las Figuras 1, 2 y 3 muestran ejemplos de agrietamiento por contracción plástica, desgarro de la superficie y agrietamiento de la superficie observados en los prototipos 4, 5 y 6. Se proporciona la ocurrencia de estos problemas y la evaluación

general del acabado por parte del contratista en la Tabla 2. La formación de costras fue evidente en la mayoría de los prototipos de concreto de cemento Tipo II. La formación de costras fue evidente cuando el agua fue empujada a la superficie de la losa cuando los acabadores aplicaron presión sobre la losa.

Sólo el Prototipo 7, la losa construida con cemento Tipo I, recibió una buena calificación por parte del contratista.

**Construcción del proyecto:** El proyecto fue construido exitosamente con cemento Tipo I.

## Tasa y capacidad de agua de sangrado, tasa de evaporación y tiempo de fraguado

Poole<sup>5</sup> indica que la pérdida de agua debido a la evaporación es particularmente crítica durante el período de curado inicial. En condiciones climáticas favorables al secado, la evaporación del agua extraída puede ser bastante rápida. Cuando la evaporación excede el sangrado, la zona cercana a la superficie de la pasta de cemento se seca, lo que resulta en contracción y desarrollo de deformaciones por tracción. Debido a que la resistencia a la tracción a edades tan tempranas es muy baja, el hormigón fresco desarrolla grietas de contracción plástica.

Por lo tanto, los objetivos más críticos de un acabador son anticipar con precisión el balance de agua entre evaporación y sangrado y tomar las medidas adecuadas para cambiar ese balance a una posición favorable.

Las directrices actuales sugieren limitar el tiempo que el hormigón permanece sin protección o limitar las tasas de evaporación.

La información del prototipo de Neuber sugiere una tasa de evaporación crítica de aproximadamente 0.05 lb/ft<sup>2</sup>/h (0.24 kg/m<sup>2</sup>/h)— idéntica a la tasa de evaporación permitida especificada para superposiciones de tableros de puentes de concreto con humo de sílice<sup>6</sup>. Y la experiencia de Neuber se relaciona con un comentario de la encuesta ACI ASCC: "...tengo que usar retardador [reductor] de evaporación, sin



**Fig. 1:** Grietas por contracción plástica antes de las operaciones de acabado.



**Fig. 2:** Desgarro de la superficie durante el allanado.



**Fig. 3:** Grietas en la superficie durante la operación de allanado, el concreto debajo de la superficie todavía es plástico.

importar la tasa de evaporación". Sin embargo, el uso de un reductor de evaporación no garantiza el éxito. En los prototipos de Neuber, la aplicación de un reductor de evaporación no dio como resultado una capacidad de acabado adecuada ni un éxito general.

**Puntos críticos durante la construcción:** La comparación del comportamiento del sangrado con condiciones probables de secado identificará posibles períodos críticos antes del momento del fraguado inicial. La Figura 4 proporciona un gráfico hipotético de evaporación y sangrado para la colocación de un pavimento de concreto de cemento Tipo I<sup>5</sup>. Durante la primera media hora, y nuevamente después de aproximadamente 4 horas, la evaporación puede exceder el sangrado. Los dos períodos, marcados con óvalos rojos, representan períodos críticos para el agrietamiento por contracción plástica. En el primer período crítico, la mezcla será plástica y podrá adaptarse a las pérdidas por evaporación



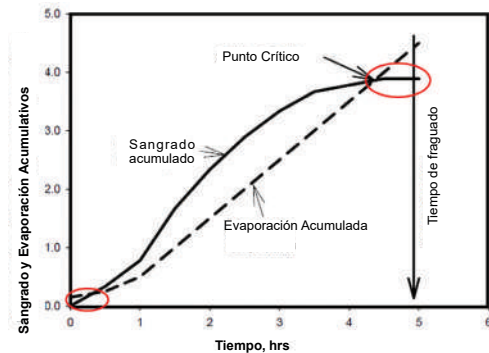
encogiéndose en una capa más delgada. Sin embargo, el agrietamiento puede ocurrir durante el segundo período porque el concreto habrá desarrollado cierta rigidez y no podrá adaptarse a la pérdida de agua simplemente reduciendo el volumen.

La Figura 5 proporciona un gráfico hipotético de evaporación y sangrado para pavimento de concreto con cemento Tipo I, tratado con un reductor de evaporación justo después del enrasado<sup>5</sup>. El reductor de evaporación desplaza la curva de evaporación acumulativa, manteniendo la evaporación acumulativa por debajo del sangrado acumulativo hasta el fraguado final en 5 horas. Este cambio elimina efectivamente cualquier período crítico de agrietamiento por contracción plástica.

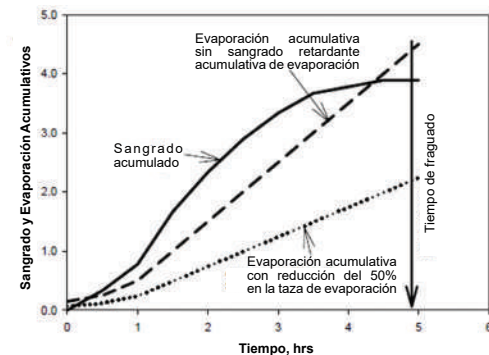
La Figura 6 proporciona un gráfico hipotético de evaporación y sangrado para la colocación de una losa de concreto de cemento Tipo IL tratada con un reductor de evaporación. Aunque el reductor desplaza la curva de evaporación acumulada, la evaporación excede el sangrado durante todo el período de curado inicial. Tal escenario expondría el concreto fresco a condiciones que favorecen la formación de costras y fisuras de contracción plástica. Ambos resultados se observaron en los prototipos de Neuber.

**Tasa de sangrado y capacidad:** Poole<sup>5</sup> informó que pavimentos de 12 pulgadas (300 mm) colocados usando concretos con una relación agua material cementante ( $w/cm$ ) que oscilaba entre 0.38 y 0.48 tenían tasas de sangrado que oscilaban entre 0.03 y 0.06 lb/pie<sup>2</sup>/h (0.15 a 0.30 kg/m<sup>2</sup>/h). Estas tasas son mucho más bajas que las observadas en hormigones sobre losa sobre terreno. Para losa sobre suelo en colocaciones para mezclas con  $a/cm$  que oscilan entre 0.47 y 0.52, por ejemplo, se observaron tasas de sangrado de 0.10 a 0.30 lb/pie<sup>2</sup>/h (0.5 a 1.5 kg/m<sup>2</sup>/h) para una losa de 6 pulgadas (150 mm) de espesor<sup>7</sup>. Thomas y Hooton<sup>8</sup>, para el estudio 2, informaron que las mezclas sin materiales cementantes suplementarios (SCM) mostraron un sangrado reducido para PLC en comparación con el cemento portland ordinario (OPC). En algunas mezclas con SCM, no se observó agua de sangrado.

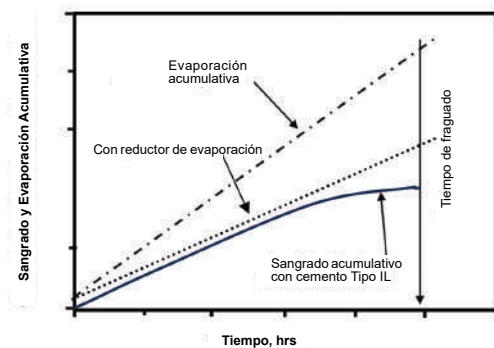
La Figura 7 ilustra la capacidad de sangrado del concreto con  $w/cm = 0.50$  con un contenido de cemento de 350 kg/m<sup>3</sup> (600 lb/yd<sup>3</sup>)<sup>9</sup>. La Mezcla C0 se produjo con cemento portland Tipo I y las



**Fig. 4:** Gráfico hipotético de sangrado y evaporación acumulativos versus tiempo para una mezcla de concreto preparada con cemento portland Tipo I. Los círculos rojos indican períodos críticos en los que la evaporación excede el sangrado (después de la Referencia 5).



**Fig. 5:** Gráfico hipotético de sangrado acumulativo y evaporación versus tiempo para una mezcla de concreto preparada con cemento Tipo I y terminada usando un reductor de evaporación inmediatamente después del enrasado. Al reducir la evaporación acumulada, el tratamiento de la superficie elimina los períodos críticos para el agrietamiento por contracción plástica (después de la Referencia 5).



**Fig. 6:** Gráfico esquemático de sangrado acumulativo y evaporación versus tiempo para una mezcla de concreto preparada con cemento Tipo IL. Según las observaciones, el sangrado acumulativo del hormigón PLC es menor que la evaporación acumulada, incluso aunque la losa haya sido tratada con un reductor de evaporación. Por lo tanto, el hormigón PLC es susceptible al agrietamiento por contracción plástica durante toda su colocación (según la Referencia 5). Al reducir la evaporación acumulada, el tratamiento de la superficie elimina los períodos críticos para el agrietamiento por contracción plástica (después de la Referencia 5).

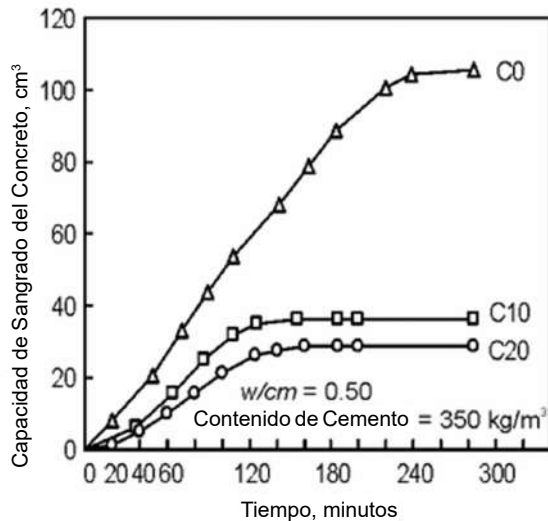


Fig. 7: Capacidad de sangrado del hormigón con  $w/cm = 0,50$  con un contenido de cemento de  $350 \text{ kg/m}^3$  ( $600 \text{ lb/yd}^3$ ). Se utilizaron un cemento portland, C0, y dos cementos de piedra caliza portland, C10 y C20<sup>9</sup>. Durante los 120 minutos iniciales, las tasas de sangrado del concreto producido con cementos C10 y C20 (con piedra caliza) fueron aproximadamente la mitad de las tasas del concreto producido con Cemento C0. Además, la capacidad de sangrado se redujo en aproximadamente un 75 % (Nota:  $1 \text{ cm}^3 = 0.06 \text{ pulg.}^3$ ).

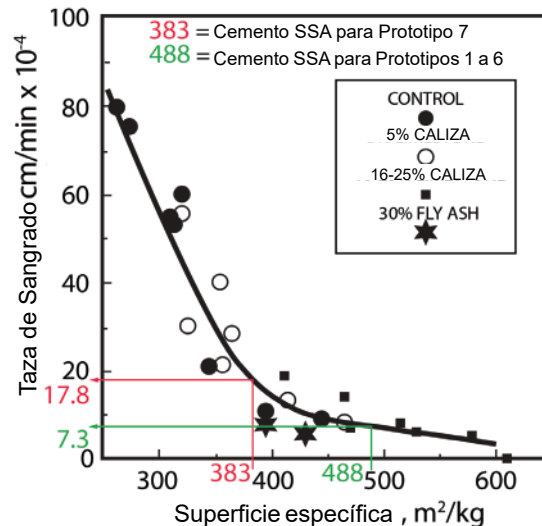


Fig. 8: La influencia del área de superficie específica (SSA) del material cementante en la tasa de sangrado (después de la Referencia 2). Hemos indicado los valores de SSA (consulte la Tabla 1) y las tasas de sangrado asociadas para los cementos utilizados en las colocaciones de Neuber (Nota:  $1 \text{ cm/min} = 0.4 \text{ pulg./min}$ ;  $1 \text{ m}^2/\text{kg} = 4.9 \text{ pies}^2/\text{lb}$ ).

Mezclas C10 y C20 se produjeron utilizando PLC. Las tasas de sangrado de las mezclas PLC fueron aproximadamente la mitad que las de la Mezcla C0. Debido a que las mezclas PLC esencialmente detuvieron el sangrado horas antes de la Mezcla C0, el agua de sangrado total para las mezclas PLC fue aproximadamente el 75% del agua de sangrado total para la mezcla de cemento Portland.

Tennis et al.<sup>2</sup> comprobaron que la tasa de sangrado está influenciada principalmente por el área de superficie específica (SSA) y no necesariamente por la cantidad de piedra caliza en el cemento (consulte la Fig. 8). Si bien los autores concluyen que “en general, no parece haber preocupación por el sangrado en mezclas que contienen cemento con piedra caliza”<sup>2</sup>, no logran enfatizar la sensibilidad de la tasa de sangrado al SSA. Por ejemplo, los valores de SSA para los cementos Tipo I y Tipo II utilizados en las losas del prototipo de Neuber (383 y 488  $\text{m}^2/\text{kg}$ , respectivamente) se correlacionan con tasas de sangrado de  $7.3 \times 10^{-4}$  y  $17.8 \times 10^{-4} \text{ cm/min}$  (Figura 8). Por lo tanto, la referencia 2 indicaría que la tasa de sangrado para el cemento Tipo II es menos de la mitad de la tasa de sangrado para el cemento Tipo I.

Como se señaló anteriormente, los datos sobre la tasa de sangrado de los concretos PLC utilizados para losas sobre terreno son escasos. Actualmente, los contratistas solicitan datos a los productores de hormigón premezclado. Neuber solicitó datos de sangrado para las mezclas de cemento PLC y Tipo I. Si bien los datos de sangrado no estaban disponibles para las mezclas del prototipo, la Fig. 8 muestra un efecto significativo basado en la finura del cemento. Además, la encuesta ACI-ASCC mostró que el 39% de los encuestados observaron menos agua de sangrado con concreto PLC que con concreto de cemento Portland Tipo I.

**Tasa de evaporación:** ACI 305R-20 proporciona algunos consejos sobre medir las tasas de evaporación. Muchos contratistas, incluido Neuber, utilizan estaciones meteorológicas Kestral que pueden calcular las tasas de evaporación basándose en mediciones de la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la temperatura del hormigón. Sin embargo, cabe señalar que las tasas proporcionadas son estimaciones basadas en un estudio de las tasas de evaporación de un lago. Además, las estimaciones no tienen en cuenta el efecto significativo del aumento de radiación solar<sup>6</sup>.



**Tiempo de fraguado:** Muchos factores afectan el tiempo de fraguado. Si bien la mayor finura del cemento Tipo IL en relación con el cemento Tipo I puede reducir el tiempo de fraguado, los SCM disminuirán el tiempo de fraguado. Por lo tanto, se debe medir el tiempo de fraguado para cualquier combinación nueva.

El momento del fraguado inicial es importante porque indica cuándo se completa el sangrado y se pueden iniciar los procedimientos de curado finales. Sin embargo, el tiempo de fraguado inicial medido por ASTM C403/C403M<sup>10</sup>, a una resistencia a la penetración de 500 psi, no es el momento correcto para iniciar los procedimientos de curado finales. Bury et al.<sup>11</sup>, Suprenant y Malisch<sup>12</sup>, Lee y Hover<sup>13</sup>, y Dodson<sup>14</sup> demostraron que la flotación mecánica debería comenzar con una resistencia a la penetración de aproximadamente 50 a 150 psi (0.3 a 1.0 MPa). Se puede utilizar la calorimetría según ASTM C1753/C1753M<sup>15</sup> para estimar el tiempo de fraguado, pero el tiempo de curado final debe calibrarse con una resistencia a la penetración de 50 a 150 psi.

## Eficacia y aplicación de los reductores de evaporación

Una diferencia importante entre losas de hormigón sobre suelo y la mayoría de las otras estructuras de hormigón es la gran relación superficie volumen. Esto hace que las losas sobre suelo sean muy susceptibles a los efectos ambientales, como el secado o las temperaturas extremas. A esto se suma la cantidad relativamente grande de este tipo de hormigón que se puede colocar en un solo día de trabajo, lo que da como resultado una gran superficie que debe gestionarse sin demora.

Por ejemplo, de acuerdo con las demandas de costos y cronogramas de los propietarios, la colocación actual de una losa industrial es de 40,000 pies<sup>2</sup> (1,700 m<sup>2</sup>) expuesta a las condiciones climáticas predominantes. Por una cuestión de economía, esta cantidad de superficie afecta fuertemente las elecciones de métodos y materiales de curado iniciales.

**Acceso:** Una losa industrial de 40,000 pies<sup>2</sup> tendría aproximadamente 275 pies de largo por 150 pies de ancho (84 m de largo por 46 m de ancho). Áreas tan grandes permitirán sólo un acceso limitado para el curado inicial durante las 3 a 8 horas que el concreto fresco estará expuesto al medio ambiente. La Figura 4 muestra el punto crítico cuando la evaporación acumulada excede el sangrado acumulativo, que es cuando las allanadoras mecánicas están sobre la losa. Las alisadoras eléctricas modernas están equipadas con contenedores con capacidad para aproximadamente 5 galones (19 L) de reductor de evaporación. Basado en la tasa de aplicación promedio recomendada por un fabricante típico de 300 pies<sup>2</sup>/gal. (7.4 m<sup>2</sup>/L), una llana tendrá suficiente reductor para cubrir aproximadamente 1,500 pies<sup>2</sup> (140 m<sup>2</sup>) de área de losa. Para concretos producidos con cemento Tipo I, la aplicación de reductor de evaporación usando llana mecánica ha funcionado bien.

Las reglas montadas sobre ruedas guiadas por láser brindan otra oportunidad para aplicar reductor de evaporación. Una regla láser de uso común tiene una capacidad de 16 gal. en su contenedor de almacenamiento (61 L) y puede aplicar reductor de evaporación a razón de 150 a 450 pies<sup>2</sup> (14 a 42 m<sup>2</sup>), por lo que la regla puede aplicar reductor solo al inicio de la colocación.

**Múltiples aplicaciones:** Se puede usar agua (en forma de niebla) o reductores de evaporación para evitar la pérdida excesiva de agua de sangrado. La aplicación de agua generalmente no enfrenta problemas graves de cumplimiento de las especificaciones y puede ser una opción razonable cuando las tasas de evaporación son tales que una o dos pasadas por el equipo de aplicación son suficientes para proteger el concreto. Poole<sup>16</sup> informa que para una tasa de aplicación de 0.04 lb/ft<sup>2</sup>/h (0.20 kg/m<sup>2</sup>/h) y una tasa de evaporación de 0.20 lb/ft<sup>2</sup>/h (1.00 kg/m<sup>2</sup>/h), sería necesario aplicar agua cada 12 minutos para evitar la pérdida de agua de amasado. Los reductores de evaporación son una opción muy práctica para ampliando este período entre las aplicaciones requeridas.

Dependiendo de las condiciones, es posible que se necesiten múltiples aplicaciones. La ecuación (1) produce una estimación conservadora de la frecuencia de aplicación de un reductor de evaporación para una condición dada

$$F = \frac{AR}{ER(1 - 0.4) - BR} \quad (1)$$

donde  $F$  es la frecuencia de aplicación en horas;  $AR$  es la tasa de aplicación;  $ER$  es la tasa de evaporación; y  $BR$  es la tasa de sangrado del concreto, con  $AR$ ,  $ER$  y  $BR$  en  $\text{lb}/\text{ft}^2/\text{h}$  o  $\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$ .

La constante, 0.4, se considera la reducción en la tasa de evaporación causada por un reductor de evaporación. La mayoría de los fabricantes afirman que la tasa de evaporación se reduce al menos en un 50%, por lo que esta ecuación probablemente sea conservadora. Un  $AR$  comúnmente recomendado es  $0.04 \text{ lb}/\text{pie}^2$  ( $0.2 \text{ kg}/\text{m}^2$ ), también expresado como  $200 \text{ pies}^2/\text{gal}$ . ( $5 \text{ m}^2/\text{L}$ ), y esta dosis se acerca al máximo que se puede aplicar prácticamente sin encharcamientos ni escurrimientos.

**Eficacia de los reductores de evaporación:** como no existe una especificación estándar para los reductores de evaporación, los contratistas deben seguir las pautas del fabricante. Una revisión de 14 reductores de evaporación enumerados en el AIA MasterSpec 03000<sup>17</sup> para concreto moldeado in situ indica que nueve de ellos proporcionan datos sobre la cantidad de reducción de humedad. Sin embargo, los datos que estos fabricantes proporcionaron para la reducción de la pérdida de humedad asociada con el viento (reducción del 80%) y la luz solar (reducción del 40%) fueron los valores informados originalmente por Cordon y Thorpe en 1965<sup>18</sup>.

Poole<sup>16</sup> investigó tres reductores de evaporación en un limitado programa de pruebas. Los morteros se prepararon de acuerdo con ASTM C156<sup>19</sup>, y se aplicaron reductores de evaporación a la dosis recomendada por el fabricante de  $200 \text{ pies}^2/\text{gal}$ . ( $5 \text{ m}^2/\text{L}$ ) inmediatamente después del moldeo. Luego, las muestras se colocaron en una sala ambiental transitable a  $38^\circ\text{C}$  ( $100^\circ\text{F}$ ), 30 % de humedad relativa, con un ventilador dirigido hacia la superficie a una velocidad de  $11 \text{ km}/\text{h}$  ( $6.7 \text{ mph}$ ). Las muestras se pesaron periódicamente y se calcularon las tasas de evaporación. A las muestras de control no se les aplicó ningún reductor de evaporación. La prueba duró 2.5 horas.

Cordon y Thorpe<sup>18</sup> probaron reductores de evaporación en ambos viento o luz solar, pero no en combinación. Poole<sup>16</sup> probó reductores de evaporación con temperatura del aire, humedad relativa y viento—condiciones climáticas previstas en el campo. Los valores de la prueba de Poole son inferiores a los observados por Thorpe y Cordon, lo cual es comprensible debido a las diferentes condiciones ambientales. Sin embargo, lo que no es comprensible es el rango de resultados de la prueba: reducción de humedad del 23, 44 y 65 % (Tabla 4). En otras palabras, no todos los reductores de evaporación son iguales. Se descubrió que el mejor producto era dos o tres veces mejor que los otros dos productos. Estos son resultados preocupantes para los contratistas de concreto que utilizan reductores de evaporación para minimizar el agrietamiento por contracción plástica y la formación de costras en la superficie.

Algunos contratistas indican que la nebulización de agua funciona mejor utilizando un reductor de evaporación, una conclusión plausible si el reductor de evaporación que evaluaron proporcionó una baja reducción de humedad.

De la limitada investigación de Poole<sup>16</sup>, parece como si la protección del concreto durante el período entre la colocación y la aplicación del curado final usando reductores de evaporación puede requerir aplicaciones repetidas, dependiendo de las condiciones. Esto se aplicaría particularmente si el tiempo de fraguado inicial fuera varias horas después de la colocación, lo que ocurre cuando las losas reciben un acabado con llana.

**Tabla 4:**

**Efecto de los reductores de evaporación sobre la evaporación del agua de sangrado de muestras de mortero.**

Evaporación reductor	Pérdida de masa, $\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$		Reducción de la evaporación, %
	Con evaporación reductor	Control	
Producto A	0.58	0.75	23
Producto B	0.49	0.88	44
Producto C	0.42	1.19	65

Nota:  $1 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{h} = 0.2 \text{ lb}/\text{pie}^2/\text{h}$

Los resultados limitados de las pruebas presentadas aquí sugieren una amplia variación en el rendimiento entre productos. Estos productos son de uso común y potencialmente desempeñan un papel en la minimización de los problemas de secado temprano de los hormigones PLC. Aunque el uso de un reductor de evaporación no resultó efectivo en los prototipos de Neuber producidas con cemento Tipo IL, está claro que la industria necesita desarrollar métodos de prueba y una especificación para reductores de evaporación.

## Mejores prácticas y estrategias para minimizar desafíos del acabado de losas

Los siguientes procesos recomendados, aunque no garantizan el éxito como lo ilustran los prototipos de Neuber, brindan la mejor solución para minimizar los desafíos de acabado de las losas:

- Durante el proceso del lote de prueba, consiga datos de una prueba de sangrado de acuerdo con ASTM C232/C232M<sup>20</sup> y una prueba de tiempo de fraguado de acuerdo con ASTM C403/C403M. Para ASTM C232/C232M, obtenga la tasa de sangrado y el volumen acumulado de agua de sangrado versus el tiempo transcurrido. Para ASTM C403/C403M, obtenga el tiempo de fraguado para una resistencia a la penetración de 150 psi. Esta información es necesaria para desarrollar un plan de curado inicial para el prototipo;
- Según el clima previsto, desarrolle un plan de curado inicial utilizando datos de tiempo de sangrado y fraguado. Evaluar opciones de acceso y técnicas para aspersión de múltiples aplicaciones de reductor de evaporación. Utilice este plan en el prototipo;
- Realizar un prototipo utilizando las herramientas previstas y técnicas e incorporar el plan de curado inicial. Algunas mezclas de concreto de cemento Tipo IL son sensibles a los cambios ambientales, por lo que se necesitan prototipos que representen el clima tanto frío (50°F [10°C]) como cálido (90°F [32°C]). Ajuste el plan según el prototipo y, si es necesario, realice otro prototipo; y
- Debido a que los datos del lote de prueba y la información del prototipo podrían no estar disponibles hasta después de adjudicarse el contrato, califique las propuestas de licitación según el tiempo previsto de acabado y curado inicial. Si las operaciones de construcción planificadas requieren más tiempo, la mezcla de concreto debe ajustarse para lograr el tiempo de sangrado y fraguado deseado, o si el plan de curado inicial anticipado cambia, una orden de cambio sería apropiada para cubrir los costos adicionales.

## Edad temprana, los retos de resistencia crítica para el concreto

Las operaciones de construcción, y por lo tanto el costo y el cronograma, dependen en gran medida de la resistencia del concreto en una etapa temprana. Los requisitos de resistencia a la compresión se especifican para la protección en climas fríos (500 psi antes del primer congelamiento y 3,500 psi antes de múltiples ciclos de congelamiento y descongelamiento según ACI 306R1621), tensionado postensado (2,500 psi según ACI CODE318 (19)22)<sup>22</sup>, y remoción de forma (75%  $f_c'$  según ACI 347R-14(21))<sup>23</sup>.

La sincronización de las juntas cortadas con sierra también se correlaciona con la resistencia a la compresión, dependiendo del tipo de agregado, que oscila entre 500 y 1,000 psi<sup>24</sup>. Por lo tanto, cualquier reducción en la resistencia o retraso en la ganancia de resistencia temprana puede afectar dramáticamente el costo y el cronograma de la construcción.

La reciente encuesta conjunta ACIASCC sobre hormigón PLC plantearon preguntas para obtener experiencias de los usuarios con el desempeño del concreto de edad temprana en diversas operaciones de construcción de resistencia crítica. Los porcentajes que se presentan a continuación representan las respuestas de 173 encuestados. Según la encuesta, las operaciones de construcción se han visto afectadas por las dificultades para lograr una resistencia temprana del hormigón PLC.



Las siguientes operaciones de construcción fueron influenciadas por la resistencia del concreto PLC de edad temprana:

- Protección contra el clima frío: el 49 % informó cambios;
- Postensado: el 11% informó retrasos;
- Descimbrado o desencofrado: el 18 % informó retrasos;
- Juntas cortadas con sierra: el 70% informó cambios en el tiempo; y
- Resistencia a la compresión: 30 % informó una disminución a los 3 días mientras que el 40% reportó disminución a los 7 días.

**Protección contra el clima frío:** Los riesgos incluyen congelación temprana antes de que el concreto alcance los 500 psi y múltiples ciclos de congelación y descongelación antes de que el concreto alcance los 3,500 psi (24 MPa). La resistencia baja o retrasada a la edad temprana aumenta la duración de la protección contra el clima frío, lo que aumenta los costos y retrasa el cronograma.

**Juntas cortadas con sierra:** Los riesgos incluyen el corte temprano que causa que la junta se desmorone (Fig. 9) y el corte tardío que causa que el concreto se agriete fuera de la junta (Fig. 10). El desmoronamiento de las juntas hace que sea más difícil rellenar las juntas y los bordes desmoronados pueden crear una estética indeseable.

Las grietas fuera de la junta pueden provocar la reparación de grietas o una disminución de la transferencia de carga. La Figura 11<sup>25</sup> ilustra la ventana de corte que los contratistas pueden necesitar ajustar para algunas losas de concreto de cemento Tipo IL. Los comentarios de la encuesta ACIASCSC incluyen: (a) “Algunos han visto grietas antes de que se pudieran cortar los cortes de sierra de entrada temprana”, (b) “El fraguado intermitente y los tiempos de fraguado impredecibles del concreto dificultaron la sincronización de los cortes de sierra. El material fragua más rápido en climas cálidos y más lento en climas fríos que el cemento equivalente I/II”, y (c) “Es necesario ser muy estricto en cuanto al tiempo de los cortes de sierra”.

**Postensado:** Los riesgos incluyen reventones de la losa al tensar y agrietamiento antes del tensado, ambos debido a la baja resistencia. En un proyecto, el productor de concreto premezclado



*Fig. 9: El corte demasiado temprano produce bordes de las juntas desmoronamientos (fotografía cortesía de Scott Metzger, Metzger/McGuire).*



*Fig. 10: El corte con sierra demasiado tarde produce grietas (fotografía cortesía de Scott Metzger, Metzger/McGuire).*

le dijo al contratista que usara la misma curva de madurez para el concreto de cemento Tipo IL que la desarrollada para el concreto de cemento Tipo I.

Como ilustra la Fig. 12, la curva de madurez del cemento Tipo I predijo en exceso la resistencia del Tipo IL, lo que provocó que las losas explotaran durante el tensado; Comentario de la encuesta ACIASCC: “Problema con la precisión de las lecturas de los medidores de madurez en las primeras etapas del curado de mezclas con aire incorporado y cemento IL.

Las lecturas del medidor de madurez sobreestimaron la resistencia. Resultó en reventones del ancla PT. Utilicé sondas Windsor para ayudar a determinar la resistencia del hormigón”.

**Eliminación del encofrado:** Los riesgos incluyen agrietamiento y mayor deflexión debido a la eliminación temprana del encofrado cuando la resistencia del concreto es baja, y un mayor costo y cronograma por el retraso en la eliminación del encofrado debido a la baja resistencia; Comentario de la encuesta ACIASCC: “Los últimos tres (clima frío, tensado y remoción de encofrados) son los los problemas más comunes y frecuentes durante toda la aplicación del cemento Tipo IL resistencias reducidas de 18 a 36 horas, lo que resulta en un retraso en el postensado, remoción de encofrados y tiempo de construcción”.

## Minimizando el reto de resistencia a edades tempranas

Mejores prácticas y estrategias recomendadas para minimizar los desafíos de resistencia a temprana edad incluyen:

- Desarrollar una nueva serie de pruebas para cada mezcla de concreto de cemento Tipo IL, midiendo la resistencia temprana a 1, 3 y 7 días. Alternativamente, desarrolle una curva de madurez en la batería de prueba de acuerdo con ASTM C1074<sup>26</sup>. Antes de realizar operaciones críticas para la resistencia, como remoción de encofrado o postensado, ASTM C1074 requiere complementar la determinación de la madurez del concreto con otras pruebas;
- Asegúrese de que los cortes de sierra se incorporen en los prototipos de losas. Algunas mezclas de concreto de cemento Tipo IL son sensibles a los cambios ambientales, lo que

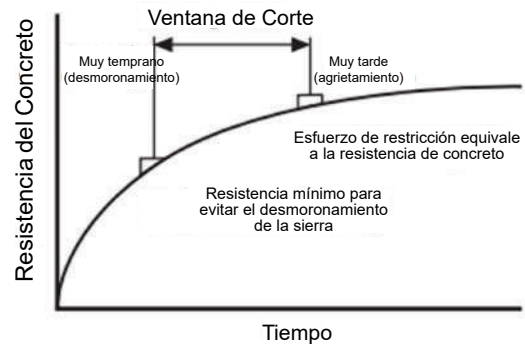


Fig. 11: La ventana de corte para algunas losas de concreto de cemento Tipo IL es muy sensible al medio ambiente, lo que dificulta evitar que se desmorone o se agriete<sup>25</sup>.



Fig. 12: Los tendones de una losa de concreto construida con concreto Tipo IL se tensionaron basándose en una calibración de madurez para concreto de cemento Tipo I. Se sobrestimó la resistencia del hormigón de cemento Tipo IL, lo que provocó reventamientos en las losas.

resulta en la necesidad de prototipos que representen climas fríos (50°F) y cálidos (90°F); y

- Debido a que los datos del lote de prueba y la información del prototipo podrían no estar disponibles hasta después de la adjudicación del contrato, califique las propuestas de licitación según el momento previsto de protección contra el clima frío, tensión de los tendones postensados y eliminación del encofrado. Si las operaciones de construcción planificadas requieren más tiempo o si es necesario ajustar la mezcla de concreto para lograr las resistencias tempranas deseadas, una orden de cambio sería apropiada para cubrir estos costos.



## Referencias

1. Smartz, BW; Laker, TS; y Van Dam, T., "Performance and Sustainability", *Concrete International*, V. 35, No. 9, septiembre de 2013, págs. 3943.
2. Tennis, PD; Thomas, MDA; y Weiss, WJ, "Estado del Informe de Arte sobre el Uso de Piedra Caliza en Cementos en Niveles de hasta el 15%", SN3148, Asociación del Cemento Portland, Skokie, IL, 2011, 78 págs.
3. Hossack, A.; Thomas, MDA; Barceló, L.; Blair, B.; y Delagrave, A., "Performance of Portland Limestone Cement Concrete Pavements", *Concrete International*, V. 36, No. 1, enero de 2014, págs. 4045.
4. Thomas, MDA; Hooton, RD; Cail, K.; Smith, Licenciatura en Letras; de Waal, J.; y Kazanis, KG, "Field Trials of Concrete Produced with Portland Limestone Cement", *Concrete International*, V. 32, No. 1, enero de 2010, págs. 3541.
5. Poole, TS, "Guía para curar pavimentos de concreto de cemento Portland, Volumen I", Informe No. FHWARD02099, Administración Federal de Carreteras, McLean, VA, enero de 2005, 49 págs.
6. Comité 305 de ACI, "Guía para el hormigonado en climas cálidos (ACI 305R20)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 28 págs.
7. "Plastic Shrinkage Cracking in Concrete", Información de ingeniería, Asociación Nacional de Concreto Premezclado, Alexandria, VA, julio de 1960, 2 págs.
8. Thomas, MDA y Hooton, RD, "La durabilidad del hormigón producido con cemento Portland Limestone: Estudios canadienses", R&D SN3142, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2010, 28 págs.
9. Irassar, EF; Bonavetti, VL; Menéndez, G.; Donza, H.; y Cabera, O., "Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with Portland Limestone Cement", Tercer Simposio Internacional Canmet/ACI: Desarrollo Sostenible y Concreto, SP202, VM Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, 2001, págs. 431450.
10. ASTM C403/C403M23, "Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado de mezclas de concreto por resistencia a la penetración", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 6 págs.
11. Enterrar, MA; Enterrar, JR; y Martin, D., "Testing Effects of New Admixtures on Concrete Finishing", *Concrete International*, V. 16, No. 1, enero de 1994, págs. 2631.
12. Suprenant, BA y Malisch, WR, "Diagnosing Slab Delaminations", *Concrete Construction*, V. 43, No. 1, enero de 1998, págs. 29-35.
13. Lee, CH y Hover, KC, "¿Qué queremos decir con 'escenario?'", *Concrete International*, V. 38, No. 8, agosto de 2016, págs. 5359.
14. Dodson, VH, "Capítulo 11—Tiempo de fraguado", Importancia de la prueba y propiedades del concreto y los materiales para la fabricación de concreto, STP 169C, P. Klieger y JF Larmond, eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 1994, 623 págs.
15. ASTM C1753/C1753M21a, "Práctica estándar para evaluar hidratación temprana de mezclas cementosas hidráulicas mediante mediciones térmicas", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, 19 págs.
16. Poole, TS, "Curado de pavimentos de hormigón de cemento Portland", Volumen II", Informe No. FHWAHRT05038, Administración Federal de Carreteras, McLean, VA, agosto de 2006, 170 págs.
17. AIA MasterSpec, Concreto moldeado in situ (Sección 033000), Deltek, Herndon, VA, 2021, 33 págs.
18. Cordon, WA y Thorpe, JD, "Control del secado rápido de Fresh Concrete by Evaporation Control", *ACI Journal Proceedings*, V. 62, No. 8, agosto de 1965, págs. 987986.
19. ASTM C156, "Método de prueba estándar para pérdida de agua [de una muestra de mortero] a través de compuestos de curado líquidos formadores de membranas para concreto", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 5 págs.
20. ASTM C232/C232M21, "Métodos de prueba estándar para el sangrado de Concreto", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, 3 págs.
21. Comité ACI 306, "Guía para el hormigonado en climas fríos (ACI 306R16)", Instituto Americano del Concreto, Farmington Hills, MI, 2016, 24 págs.
22. Comité ACI 318, "Requisitos del código de construcción para estructuras Concreto y comentario (CÓDIGO ACI31819) (reaprobado en 2022)", Instituto Americano del Concreto, Farmington Hills, MI, 2019, 624 págs.
23. Comité 347 de ACI, "Guía de encofrados para concreto (ACI 347R14) (reaprobada en 2021)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 36 págs.
24. Okamoto, Pensilvania; Nussbaum, PJ; Smith, KD; Darter, Michigan; Wilson, TP; Wu, CL; y Tayabji, SD, "Guías para el momento de la contracción del aserrado de juntas y la carga más temprana para pavimentos de concreto, Volumen I", Informe No. FHWA RD91079, Administración Federal de Carreteras, Washington, DC, 1994, 227 págs.
25. "CPTP TechBrief: Aserrado de entrada temprana de cemento Portland Concrete Pavements", FHWAHIF07031, Administración Federal de Carreteras, Washington, DC, junio de 2007, 6 págs.
26. ASTM C107419, "Práctica estándar para estimar el concreto Resistencia según el método de madurez", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 11 págs.



**James Klinger**, miembro de ACI, es especialista en construcción de concreto para la Sociedad Estadounidense de Contratistas de Concreto (ASCC), St. Louis, MO, EE. UU. Es miembro de los Comités de ACI 134, Constructibilidad del Concreto, y 318, Código de Construcción de Hormigón Estructural; ACI Subcomité 318-A, General, Concreto, y Construcción; y Conjunto ACIAS-CC Comité 117, Tolerancias. Recibió el premio ACI Construction Award 2020 y el premio ACI Roger H. Corbetta Concrete Constructor 2022. Klinger obtuvo su maestría en ingeniería estructural de la Universidad de Maryland, College Park, MD, EE. UU.



**Joseph F. Neuber Jr.**, FACI, es el fundador del Grupo de Empresas Neuber. Posee patentes sobre métodos y dispositivos para la construcción de suelos. Es autor de numerosos artículos en *Concrete International* y de otras publicaciones sobre industrias, y ha realizado múltiples seminarios en *World of Concrete* y otros eventos de la industria. Neuber ha sido presidente de Comité ACI 302, Construcción de Pisos de Concreto, y es miembro del Comité ACI 360, Diseño de Losas sobre Terreno.



**Jeffrey Ondo** es director de proyectos de Neuber Concrete. Su especialidad es la construcción de losa sobre terreno y muro inclinado. Desde 1990, ha colocado más de 25 millones de pies cuadrados (2.3 millones de m<sup>2</sup>) de pisos comerciales e industriales de concreto. Él ha sido capacitado por algunos de los mejores contratistas de pisos en los Estados Unidos mientras adquiría conocimientos adicionales de miembros de ACI y Tilt-Up Concrete Association (TCA). Su experiencia continúa creciendo a medida que la industria del concreto evoluciona hacia nuevas alturas.



**Bruce A. Suprenant**, FACI, es presidente de Subcomité ACI 117M, Movimientos Afectando a las Tolerancias y Vicepresidente del Comité Conjunto ACI-ASCC 117, Tolerancias, así como un miembro de los Comités ACI 134, Concreto Constructibilidad; y 302, Construcción de Pisos de Concreto. Sus honores incluyen ACI Concrete International 2022 Premio, ACI 2021 Medalla Arthur R. Anderson, ACI 2020 Construction Award, el Premio de Certificación ACI 2013, el Premio ACI Roger H. Corbetta Concrete Constructor 2010 y el Premio ACI Construction 2010.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Ecuador Centro y Sur

*Título: Minimizando el riesgo de Losas de hormigón con Cemento Portland—Caliza*



Traductor:  
Cristian Vallejo Delgado



Revisor Técnico:  
Ing. Santiago Velez  
Guayasamín,  
MSc DIC