

# Excessive Overdesign of Concrete Mixtures for Strength—Causes and Solutions

by Luke M. Snell, Karthik H. Obla, and Nicholas J. Carino

Recently, there have been a lot of discussions about concrete mixtures being overdesigned for compressive strength. Many instances have occurred where concrete mixtures with a 28-day specified strength of 4000 psi have exceeded 7000 psi in measured average strength. These strengths greatly exceed the required average strengths given in ACI SPEC-301-20.<sup>1</sup> This results in an increased carbon footprint due to much higher cementitious materials used and added construction costs. The mixtures also have higher paste contents that can lead to other performance problems, such as cracking, higher in-place concrete temperatures, excessive shrinkage and creep, and alkali-silica reaction. In this article, we discuss some of the reasons why concrete mixtures are overdesigned and offer solutions to reduce this issue.

## Concrete Test Results

The making and testing of concrete specimens to determine compliance with project requirements should be in accordance with the practices and test methods specified in the contract documents, such as ASTM C31/C31M and ASTM C39/C39M. These tests are also referred to as acceptance tests. A compressive strength test is the average strength of two 6 x 12 in. or three 4 x 8 in. concrete cylinders.<sup>2</sup>

Compressive strength test results for a given class of concrete are assumed to follow a normal distribution, often called a “bell curve.” This assumption is appropriate in most cases if concrete strength does not exceed 10,000 psi.<sup>3</sup> Figure 1 shows a typical normal frequency distribution curve, which indicates the frequency of test results with different strength values.

The normal distribution is mathematically defined completely by two statistical parameters: the population mean  $\bar{X}$  and the sample standard deviation  $s$ , which is a measure of the variability of test results. The standard deviation depends on the material, manufacturing, and testing variations.

## ACI CODE-318 Strength Acceptance Criteria

The ACI Building Code, Section 26.12.3.1,<sup>2</sup> states that the strength level of a concrete mixture shall be acceptable if the following requirements are satisfied:

- Every average of any three consecutive strength tests equals or exceeds the specified strength  $f'_c$ ; and
- No strength test falls below  $f'_c$  by more than 500 psi if  $f'_c$  is 5000 psi or less; or by more than  $0.10f'_c$  if  $f'_c$  exceeds 5000 psi.

If either of these two requirements is not satisfied, steps need to be taken to increase strength test results. If the second requirement is not met, the low-strength test result needs to be investigated.

## What is overdesign?

Investigations of low-strength test results typically lead to considerable expense and delays in project schedules. These problems can be reduced by ensuring that the average strength is greater than the specified strength. ACI SPEC-301-20,

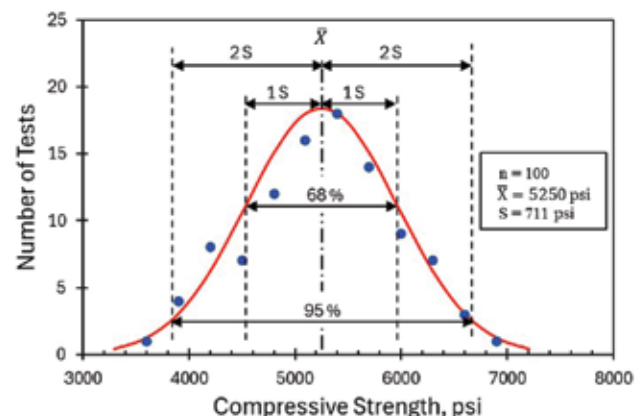


Fig. 1: Normal distribution curve for strength test results

Table 4.2.3.3(a)1, provides a way to calculate the required average strength so there is a high likelihood of meeting the acceptance criteria. It states that the proposed concrete mixture should be proportioned to produce an average strength that is greater than the values calculated by the following equations:

$$f'_{cr} = f'_c + 1.34ks \tag{1}$$

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33ks - 500 \text{ (if } f'_c \leq 5000 \text{ psi)} \tag{2a}$$

or

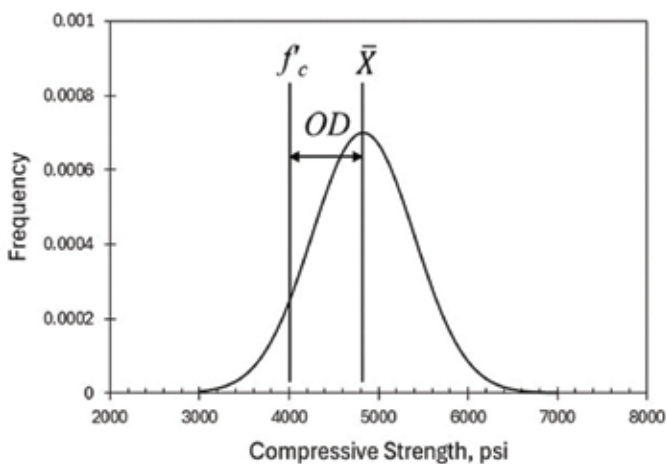
$$f'_{cr} = 0.90f'_c + 2.33ks \text{ (if } f'_c > 5000 \text{ psi)} \tag{2b}$$

where  $f'_{cr}$  is the required average strength for the mixture;  $f'_c$  is the specified strength given in the specifications; and  $k$  is the factor for increasing the sample standard deviation  $s$ , if less than 30 test results are considered in calculating the standard deviation. The  $k$  values are provided in Table 4.2.3.3(a)2 of ACI SPEC-301-20.

The standard deviation is determined from strength test results obtained in past projects for similar concrete mixtures. ACI SPEC-301-20, Sections 4.2.3.4(a) and 4.2.3.4(b), provide requirements for past strength records. In the absence of past records, the required average strength must be greater than  $f'_c$  by a fixed value that depends on  $f'_c$ . This is provided in Table 4.2.3.3(b) of ACI SPEC-301-20.

The ACI SPEC-301-20 equations have been developed statistically to ensure that the likelihood of failing to meet the Code strength acceptance criteria is not greater than one in 100.

In summary, in industry parlance, overdesign is the difference between  $f'_c$  and the average strength that is attained in the project. This is shown in Fig. 2. As will be explained, the problem is that  $\bar{X}$  is often much greater than  $f'_{cr}$ . Also, there will always be a fraction of test results below the specified strength.



**Fig. 2: Overdesign (OD) strength shown as the difference between the specified strength and the average strength attained in the project**

## Design Example

$f'_c = 4000$  psi (from the project’s specification)

$s = 412$  psi (calculated from 30 test results from recent production by the batch plant for this or similar mixture proportions)

$k = 1.0$  (from ACI SPEC-301-20, Table 4.2.3.3(a)2)

Calculation of the required average strength of the mixture using Eq. (1) and (2a):

$$f'_{cr} = 4000 + (1.34 \times 1.0 \times 412) = 4550 \text{ psi}$$

$$f'_{cr} = 4000 + (2.33 \times 1.0 \times 412) - 500 = 4460 \text{ psi}$$

The higher value is to be selected. Therefore, the required average strength for the mixture would be 4550 psi. The mixture submittal should document that the proposed concrete mixture proportions will produce an average compressive strength equal to or greater than 4550 psi. So, the overdesign for compliance with ACI SPEC-301-20 is 550 psi. This ensures a 99% likelihood that the ACI CODE-318-19(22) acceptance criteria will be satisfied.

As stated earlier, there have been instances of overdesigns exceeding 3000 psi. It can be calculated that every 100 psi increase in average strength would contribute about a 2% increase in embodied carbon. This calculation is based on the National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) industry-wide life-cycle assessment for ready mixed concrete.<sup>4</sup> So, reducing excessive overdesign values is desirable and beneficial for several reasons, as mentioned in the introduction.

On a given project, four separate entities affect the average strength of concrete. These are the licensed design professional (LDP) that develops the specifications, the concrete supplier that produces the concrete to the required specifications, the contractor that buys and places the concrete, and the testing agency that samples and tests the concrete delivered to the jobsite. Each of these entities has to play their part if unnecessarily high overdesigns are to be avoided.

## Can We Reduce Overdesign?

### Licensed design professional

The LDP determines the specified strength of the concrete based on the structural design requirements. The LDP also ensures that the concrete has sufficient durability. The durability requirements of the concrete are covered in Chapter 19 of ACI CODE-318-19(22). This chapter defines four exposure categories (freezing and thawing, sulfate exposure, contact with water, and corrosion protection of reinforcement) and various exposure classes based on the severity of each exposure category. It also defines the concrete requirements for each exposure class. The primary intent of these requirements is to provide sufficient resistance to penetration by water and dissolved chemicals that can cause durability failures. This is addressed by stipulating a maximum water-cementitious materials ratio ( $w/cm$ ) and a minimum  $f'_c$ . Because  $w/cm$  cannot easily be verified during construction, the strength requirement serves as an acceptance

criterion. As listed in Table 19.3.2.1 of ACI CODE-318-19(22), the paired  $w/cm$  and strength requirements for different exposure classes are: 0.40 and 5000 psi; 0.45 and 4500 psi; 0.50 and 4000 psi; and 0.55 and 3500 psi. To summarize, the LDP selects a  $f'_c$  that satisfies structural design requirements as well as durability requirements.

In addition to strength and  $w/cm$ , ACI CODE-318-19(22) requires the LDP to specify an air content based on the nominal maximum aggregate size and the freezing-and-thawing exposure class (Table 19.3.3.1). The specified air contents can be reduced by 1% if  $f'_c$  equals or exceeds 5000 psi (Section 19.3.3.6).

Frequently, the LDP specifies additional requirements over and above the ACI CODE-318 requirements. Some of these and their implications on the overdesign are discussed herein.

**Minimum cementitious materials requirements:** Some LDPs will specify a minimum cementitious materials content. For example, a specification that requires a minimum cementitious materials content of 700 lb/yd<sup>3</sup> and a specified compressive strength of 4000 psi can result in an average strength of over 7000 psi, that is, an overdesign of about 3000 psi. The implication of minimum cementitious materials content requirement discussed in ACI PRC-329.1T-18 concludes that there are numerous benefits associated with eliminating requirements for minimum cementitious materials content and adopting performance-based alternatives in specifications.<sup>5</sup>

**Overly conservative interpretation of Code requirements:** ACI CODE-318-19(22) stipulates a maximum  $w/cm$  only for concrete durability exposure classes F1 to F3, S1 to S3, W2, and C2. Requiring a low  $w/cm$  for concrete that is not subject to such durability exposure classes or requiring a lower  $w/cm$  than that warranted by the durability exposure class will result in higher average strengths. For example, for concrete without any durability exposure requirements, it is not uncommon to see a  $f'_c$  of 4000 psi, a maximum  $w/cm$  of 0.40, and no air entrainment. The average compressive strength for such a mixture is likely to be over 7500 psi, that is, an overdesign of 3500 psi. This is roughly three to five times the overdesign needed to have a high likelihood of meeting the strength acceptance criteria, depending on production variability.

ACI CODE-318-19(22) requires entrained air content only for concrete durability Exposure Classes F1 to F3. A column subject to Exposure Class F1 requires an air content between 3.5 and 6.0%, depending on the aggregate size (Table 19.3.3.1). If the LDP wants to be conservative and selects a target air content of 6.5%, there can be about a 10 to 30% loss in strength, with a higher percentage strength loss for higher-strength concretes.<sup>6</sup> Specifying air contents that exceed the Code requirement results in mixtures with a higher carbon footprint. Researchers are conflicted about the need for air entrainment for high-strength concrete.<sup>6</sup> Because strength loss is greater for high-strength concrete, the air content required by the Code should not be exceeded for high-strength concrete columns.

In the event of a low-strength investigation, ACI CODE-318-19(22) requires that if coring is necessary, three cores are to be taken from the area of the suspected low-strength concrete. The average strength of the three cores needs to be at least 85% of  $f'_c$  with no single core strength below 75% of the  $f'_c$  (Section 26.12.6.1). The authors have seen project specifications requiring concrete cores to exceed 100% of the specified strength. Such specifications tend to increase the overdesign so that the likelihood of having to conduct low-strength investigations is reduced. ACI E702.8-22 provides guidance for evaluating concrete test results according to the Code through three case studies.<sup>7</sup>

**Lack of knowledge about ACI acceptance criteria for specimens:** As stated earlier, according to ACI CODE-318-19(22), Section 26.12.3.1, low-strength investigations are required only if a single test result falls below  $f'_c$  by 500 psi for  $f'_c$  less than 5000 psi or  $0.10f'_c$  if  $f'_c$  exceeds 5000 psi. Recall that a strength test result is the average strength of two 6 x 12 in. or three 4 x 8 in. cylinders.

One of the authors was contacted by an LDP about doing a low-strength investigation when one cylinder from a test result was below the  $f'_c$  or when a strength test result was below  $f'_c$ , but not 500 psi below  $f'_c$ . These misinterpretations of Code requirements invariably lead to project delays, increased costs, and disputes. To reduce the chance of such unnecessary disputes, the concrete producer may choose to use a higher overdesign than is necessary.

**Not designing structural members for actual concrete strength:** Sometimes the LDP may reduce the number of strength classes to avoid complexity. This results in some parts of the structure having a compressive strength that is much higher than that required for safety. Alternatively, the compressive strength required to meet the Code exposure classes for durability may be higher than the compressive strength used for structural design. In such situations, the structural elements should be designed to take advantage of the higher strength needed for durability. This may result in reduced member sizes, which in turn will lead to reduced dead load and a lower carbon footprint.

Some structural elements, such as foundations, may not have to resist design loads for several months after they are built. In such situations, it may be prudent to specify strength at 56 days. Alternatively, a strength versus age relationship can be developed and a lower 28-day strength can be accepted if curing is adequate to ensure the required strength development.

Some LDPs determine the required average strengths in accordance with Table 4.2.3.3(b) of ACI SPEC-301-20, even if past strength test data are available. This requires an overdesign of 1200 psi for  $f'_c$  of 4000 psi, which in most instances will be higher than the overdesign calculated if past data are available.

NRMCA Publication 2PE004-21<sup>8</sup> provides several suggestions on how LDPs can improve specifications and ensure better performance and sustainability.

## Contractor

**Requiring high early strength:** For rapid scheduling of construction operations such as formwork release or application of prestressing, high-early-age strengths may be required. An arbitrary strength requirement of 75% of  $f'_c$  at 2 or 3 days may translate to a strength well over 7000 psi at 28 days, even though only 4000 psi may be required by the structural design. Thus, the unintended consequence of requiring an arbitrary high-early-age strength will result in excessive overdesign of the concrete mixture. The early-strength requirements should be based on actual early design loads instead of an arbitrary requirement such as 75% of  $f'_c$  at 3 days.

## Testing agency

**Initial curing at the jobsite:** ACI CODE-318-19(22), Section 26.12.1.1, requires that test specimens prepared for acceptance testing for  $f'_c$  shall be subject to standard curing in accordance with ASTM C31/C31M. The strength of standard-cured cylinders does not represent the in-place strength of the concrete in the structure, but it serves as the basis for judging the adequacy of concrete delivered to the project. Standard curing of test specimens consists of initial curing at the project site, transportation to the laboratory, and final curing at the testing agency. Acceptable conditions are specified for each phase. The initial curing portion involves storing the specimens for a period of up to 48 hours in an environment that maintains a curing temperature in the range of 60 to 80°F and controls moisture loss from the specimens. For concrete mixtures with  $f'_c$  of 6000 psi or greater, the initial curing temperature shall be between 68 and 78°F.

ACI SPEC-301-20, Section 1.7.2.2(c), requires the contractor to supply electricity and space to store the cylinders while they are on the construction site. ACI PRC-132-14 states that the LDP should define the responsibilities for initial curing in the construction documents, and the testing agency should include the cost of the initial curing in the bid for testing services.<sup>9</sup> In a majority of projects, however, cylinders are not subject to initial curing in accordance with ASTM C31/31M.<sup>10</sup> In too many projects, we have observed cylinders left unprotected in temperatures exceeding 90°F or in freezing weather. Several studies have shown that if cylinders are not subject to proper initial curing, the strength loss can be about 20% compared with cylinders subject to standard curing.<sup>11,12</sup> An added problem is that many jobsites are secured and closed on the weekends. Concrete cylinders cast on Friday cannot be picked up until Monday (if Monday is a holiday, they would be picked up on Tuesday). This results in cylinders being on the jobsite for more than the allocated 48 hours.

Because the jobsite conditions are likely unknown when the mixture proportions are being developed, the concrete producer may increase the overdesign to compensate for possible lapses in following standard procedures for curing the specimens.

**Lack of enforcement of testing standards:** Some stakeholders (this could be the owners, LDPs, or contractors) view testing only from a cost viewpoint and not as a professional service. Even though ACI CODE-318-19(22), Section 26.12.1.1, states that certified testing agencies and certified technicians are needed to test the concrete, this is not always enforced on projects. The selection of the testing agency is often based on a low bid rather than qualifications. There is little or no monitoring of the testing services as long as no issues are identified. When we do seminars throughout the country, we hear complaints that there is a testing agency in the area that is a high-volume, low-quality company. In many cases, contractors and concrete producers do not confront these problematic testing agencies because they may have to work with them on future projects. If the entity that hires the testing agency does not ensure the quality of the testing, the producer may choose to excessively overdesign the concrete to account for the possibility of poor testing.

**Inability of the concrete producer to obtain test results:** Concrete test results are often not routinely sent to concrete producers unless there are low-strength results. Concrete producers are unable to see how the strength test results are trending and make mixture adjustments to avoid excessive overdesign or low-strength investigations. Concrete producers are left “flying in the dark,” and to protect themselves, they overdesign the concrete mixtures.

ACI SPEC-301-20, ACI SPEC-311.6-18,<sup>13</sup> and the AIA MasterSpec<sup>14</sup> state that the concrete producer is entitled to receive strength test reports in a timely manner. While testing agencies have a contract to send test reports to the people identified in their contracts, they have a responsibility to inform their clients about the ACI requirements to share test reports with the producer.

## Concrete producer

**Rational Code interpretations:** Because concrete strength test data typically follow a normal distribution, there is always a probability of a failing test result regardless of the average strength. However, the higher the average strength, the lower the probability of a failing test result. Because a typical concrete company has its concrete tested thousands of times every year, a chance of one test result in 100 failing guarantees multiple low test results in a year. This could be an expensive problem that the concrete producer would rather avoid, leading to the production of concrete with an excess overdesign so that the chance of having failing test results is much lower than one in 100 tests.

The ACI SPEC-301-20 equations to calculate the required average strength are based on a probability that one test in 100 will fail the acceptance criteria. Yet, ACI CODE-318-19(22), Section 26.12.3.1, requires a low-strength investigation if the second acceptance criterion (Eq. (2a) and (2b)) is not met. However, given that some low test results are inevitable, the LDP should use engineering judgment. The LDP should determine if there is an actual strength deficiency before

launching into a coring program. If the likelihood of low-strength concrete is confirmed and calculations indicate that structural adequacy is significantly reduced, then core tests can be considered. NRMCA Publication No. 133 provides a stepwise approach for conducting investigations of low-strength test results.<sup>15</sup> It discusses steps the project team can undertake before taking cores from the structure.

**Inability to change mixture proportions:** Once a proposed mixture has gone through the multistep process of approval, it can be difficult to get approval to make a change. Usually, an approved mixture will be used throughout the project. This means that in a long-term project, the concrete producer would need to design for the worst-case conditions when it comes to the quality of the materials, manufacturing, and testing. Thus, in most situations, the mixture will be oversized except if the worst-case conditions occur.

Commentary Section R26.12.3.1(b) of ACI CODE-318-19(22) lists several reasons why it may be necessary or beneficial to adjust concrete mixtures during the course of a project. The Code states that evidence acceptable to the LDP shall be submitted to demonstrate that the modified mixture complies with the requirements in the construction documents. Industry practice is to calculate a psi/lb value (compressive strength per lb of cementitious material) and adjust cementitious materials contents to accommodate small changes in strength. This approach can work only if the material sources are not changed. Some agencies may permit small changes to mixtures without requiring a submittal. For example, the Florida Department of Transportation allows the cementitious materials content to vary  $\pm 6.5\%$  without a submittal.<sup>16</sup> Admixture dosages can also be varied. This allows the concrete producer to adjust mixtures as job conditions change and avoid proportioning for the worst-case condition.

**Quality control issues:** The mixing water content in a batch can vary due to an unknown amount of wash water present in the mixer drum before batching, incorrect aggregate moisture determinations, incorrect amount of batch water, and water added at the wash rack and the jobsite. For these reasons, the exact amount of water is not known, and the  $w/cm$  cannot be calculated accurately. A variable  $w/cm$  can lead to variability in concrete strength.

In addition to the mixing water variation, there can be variability due to materials, manufacturing, and testing. On long-term projects, there can be different personnel performing these functions, which adds to the variability.

Table 1 shows the calculated overdesigns for various standards of concrete control from ACI PRC-214-11(19) for concrete with  $f'_c = 4000$  psi.<sup>17</sup>

By reducing the standard deviation from 1500 to 450 psi, the overdesign can be reduced from 3000 to 600 psi. Interestingly, if a producer wants to be conservative and design the mixtures for a one in 1000 failure probability (10 times less risky than ACI SPEC-301-20), they will have to raise the overdesign by just 290 psi if the standard deviation is 450 psi, but raise the overdesign by 1140 psi if the standard deviation is 1500 psi. So, attaining a lower standard deviation will provide a substantial increase in risk reduction for a smaller increase in overdesign, which is in the best interest of all stakeholders including the owner.

Some producers may choose to use an excessive overdesign instead of improving concrete quality practices. This approach can be discouraged by requiring producers to have personnel, plants, and trucks that are qualified according to local Department of Transportation (DOT) or NRMCA requirements. Improved quality practices targeting a lower standard deviation and lower overdesign are penalized by concrete specifications that have minimum cementitious materials, or unnecessary maximum  $w/cm$  requirements, or both.

## Conclusions

Overdesign of concrete mixtures is a necessary part of producing quality concrete that will comply with acceptance criteria. The average strength requirements in ACI SPEC-301-20 provide acceptable values of overdesign. But as discussed in this article, there are many reasons why higher overdesigns are common. However, excessive overdesign leads to higher costs, poor concrete durability, and is not good for the environment. To avoid unnecessarily high overdesigns, we provide the following recommendations:

- Avoid specifying minimum cementitious materials contents in project specifications;
- Specify the maximum  $w/cm$  that ACI CODE-318 requires for the applicable exposure classes. Do not specify a lower maximum  $w/cm$ ;
- Specify air content only if the ACI CODE-318 exposure classes require it, and do not specify a higher air content than the Code requirement. This is particularly true for high-strength concrete;
- Be clear in the specifications that different ACI CODE-318

**Table 1:**  
Calculated overdesigns for various standards of concrete control for  $f'_c$  of 4000 psi

| Quality standards<br>(ACI PRC-214-11(19)) | Excellent | Very good | Good | Fair | Poor | Poor | Poor |
|---|-----------|-----------|------|------|------|------|------|
| s, psi                                    | 350       | 450       | 550  | 650  | 750  | 1200 | 1500 |
| $f'_c$<br>(ACI SPEC-301-20), psi          | 4470      | 4600      | 4780 | 5020 | 5250 | 6300 | 7000 |
| Overdesign, psi                           | 470       | 600       | 780  | 1020 | 1250 | 2300 | 3000 |

strength acceptance criteria apply for cylinder and core strengths. Arbitrary, unclear, or more stringent requirements result in high overdesigns;

- Use field strength test records if available to calculate the required average strength;
- Require high early strength only if needed. The early-strength requirements should be based on early design loads instead of arbitrary requirements such as 75% of  $f'_c$  at 3 days. If the 28-day strength will be higher because of high-early-age strength requirements or durability exposure considerations, take advantage of the higher strength in the structural design;
- Make sure concrete test specimens are cured and tested in accordance with the applicable standards, particularly their initial curing, which is often overlooked. Ensure inspectors enforce initial curing of specimens on the jobsite;
- Ensure testing agencies performing acceptance testing conform to ASTM C1077 and technicians testing concrete have ACI field or laboratory certifications;
- Ensure all stakeholders, particularly concrete producers, receive concrete acceptance test results in a timely manner;
- There is always the possibility of a small number of test results not meeting the ACI CODE-318 acceptance criteria

even if the overdesign meets project requirements. The LDP should use engineering judgment in evaluating the significance of low-strength test results;

- Allow the cementitious materials contents and admixture dosages to vary over a specified range without requiring a new mixture submittal; and
- Concrete producers should follow good quality control practices and strive for a low standard deviation and a low overdesign. Ensure producers have personnel, plants, and trucks that are qualified according to local DOT or NRMCA requirements.

While we have identified many approaches for reducing the overdesign of concrete, implementing just a few of them can result in substantial reductions. In some ways, the approaches go hand in hand. For example, performance-based specifications (first two bullets) and testing in accordance with standards (the seventh bullet) will motivate producers to improve quality control and attain a lower standard deviation, thereby permitting a lower overdesign. If many of the steps suggested above are undertaken, a reasonable overdesign can be around 800 psi for concrete with a  $f'_c$  below 5000 psi, rather than the 1500 to 3000 psi used currently in many projects.

# Get the Recognition You Deserve

Submit your project now  
for the 2025 Excellence  
in Concrete Construction  
Awards...deadline is  
April 29, 2025.

For more information,  
visit [www.ACIExcellence.org](http://www.ACIExcellence.org).



## References

1. ACI Committee 301, "Specifications for Concrete Construction (ACI SPEC-301-20)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 69 pp.
2. 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.
3. Cook, J.E., "Research and Application of High-Strength Concrete Using Class C Fly Ash," *Concrete International*, V. 4, No. 7, July 1982, pp. 72-80.
4. "A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Ready-Mixed Concrete Manufactured by NRMCA Members – Version 3.2," Athena Sustainable Materials Institute, Ottawa, ON, Canada, 2022, 101 pp., [https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2022/02/NRMCA\\_LCARReportV3-2\\_20220224.pdf](https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2022/02/NRMCA_LCARReportV3-2_20220224.pdf).
5. ACI Committee 329, "Minimum Cementitious Materials Content in Specifications (ACI PRC-329.1T-18)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2018, 4 pp.
6. ACI Committee 363, "Report on High-Strength Concrete (ACI PRC-363-10)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010, 65 pp.
7. ACI Committee E702, "Designing Concrete Structures: Evaluation of Concrete Cores Test Results According to ACI 318-19 (ACI E702.8-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2022, 8 pp.
8. "Guide to Improving Specifications for Ready Mixed Concrete," NRMCA Publication 2PE004-21, National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2021, 37 pp., <https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2020/10/GuideToSpecs.pdf>.
9. ACI Committee 132, "Guide for Responsibility in Concrete Construction (ACI PRC-132-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 11 pp.
10. "Concrete Testing Adherence Collaboration," Colorado Ready Mixed Concrete Association (CRMCA), Centennial, CO, <https://www.concretetac.com/>, accessed Apr. 12, 2024.
11. Obla, K.H.; Werner, O.R.; Hausfeld, J.L.; MacDonald, K.A.; Moody, G.D.; and Carino, N.J., "Who is Watching Out for the Cylinders?" *Concrete International*, V. 40, No. 8, Aug. 2018, pp. 28-35.
12. "Reliable Concrete Acceptance Testing for Improved Sustainability and Performance," NRMCA Position Statement, National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2024, 2 pp., [https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/NRMCA\\_Position\\_Statement.pdf](https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/NRMCA_Position_Statement.pdf).
13. ACI Committee 311, "Specification for Testing Ready-Mixed Concrete (ACI SPEC-311.6-18)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2018, 5 pp.
14. "AIA MasterSpec: Section 033000 – Cast-in-Place Concrete," American Institute of Architects, Washington, DC, 2023, 64 pp.
15. "In-Place Concrete Strength Evaluation—A Recommended Practice," NRMCA Publication No. 133, National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2011, 10 pp.
16. "Materials Manual," Volume II, Section 9.2.6.3.1, revised July 2024, Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL, [https://fdotwww.blob.core.windows.net/sitefinity/docs/default-source/programmanagement/implemented/urlinspecs/july24/section92v2-724c1naed6fc2-255d-477f-8e3e-081b29cb864d.pdf?sfvrsn=4154e834\\_1](https://fdotwww.blob.core.windows.net/sitefinity/docs/default-source/programmanagement/implemented/urlinspecs/july24/section92v2-724c1naed6fc2-255d-477f-8e3e-081b29cb864d.pdf?sfvrsn=4154e834_1).
17. ACI Committee 214, "Guide to Evaluation of Strength Test

Results of Concrete (ACI PRC-214R-11) (Reapproved 2019)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 16 pp.

Note: Additional information on the ASTM standards discussed in this article can be found at [www.astm.org](http://www.astm.org).

Selected for reader interest by the editors.



ACI Honorary Member **Luke M. Snell** is a Concrete Consultant and a Professor Emeritus at Southern Illinois University Edwardsville, Edwardsville, IL, USA. He is a member and past Chair of ACI Committees 120, History of Concrete, and E702, Designing Concrete Structures. Snell is also a member of ACI Committees C630, Construction Inspector Certification, and S801, Student Competitions. He is a

licensed professional engineer in Missouri.



**Karthik H. Obla**, FACI, is Senior Vice President of Technical Services at the National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), Alexandria, VA, USA. He is Chair of ACI Committee 214, Evaluation of Results of Tests Used to Determine the Strength of Concrete, a member and past Chair of ACI Committee 232, Fly Ash and Bottom Ash in Concrete; and a member of ACI Committees C690,

Concrete Quality Technical Manager Certification; 201, Durability of Concrete; 211, Proportioning Concrete Mixtures; 236, Material Science of Concrete; 240, Pozzolans; 329, Performance Criteria for Ready Mixed Concrete; 365, Service Life Prediction; and 555, Concrete with Recycled Materials. He has served as Chair of ASTM Subcommittee C09.49, Pervious Concrete. He received his BTech in civil engineering from the Indian Institute of Technology (IIT BHU) Varanasi, Varanasi, Uttar Pradesh, India, and his MS and PhD in civil engineering from the University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA. Obla is a licensed professional engineer in Maryland.



ACI Honorary Member **Nicholas J. Carino** retired from the National Institute of Standards and Technology after 25 years of service as a Research Structural Engineer. He serves on several ACI committees, including E707, Specification Education; 228, Nondestructive Testing of Concrete; 301, Specifications for Concrete Construction; 329, Performance Criteria for Ready Mixed Concrete; 437, Strength

Evaluation of Existing Concrete Structures; and 562, Evaluation, Repair and Rehabilitation of Concrete Structures; and ACI Subcommittee 318-A, General, Concrete, and Construction. Carino is also a Fellow of ASTM International and served as Chair of ASTM Committee C09, Concrete and Concrete Aggregates.

# 05

## Exceso de Sobre diseño en Mezclas de Concreto para Resistencia: Causas y Soluciones

Por Luke M. Snell, Karthik H. Obla, y Nicholas J. Carino

Recientemente, han surgido muchas discusiones sobre mezclas de concreto que están sobre diseñadas en cuanto a la resistencia a la compresión. En varios casos, las mezclas de concreto con una resistencia especificada a 28 días de 4,000 psi han superado los 7,000 psi en su resistencia promedio medida. Estas resistencias exceden significativamente las resistencias promedio requeridas establecidas en ACI SPEC-301-20<sup>1</sup>. Esto resulta en una mayor huella de carbono debido a la cantidad elevada de materiales cementantes utilizados y en costos adicionales de construcción. Las mezclas también tienen contenidos de pasta más altos, lo que puede provocar otros problemas de desempeño, como fisuración, temperaturas más elevadas en el concreto en sitio, retracción, flujo plástico excesivo y reacción álcali-sílice. En este artículo, discutimos algunas de las razones por las cuales las mezclas de concreto están sobre diseñadas y ofrecemos soluciones para reducir este problema.

### Resultados de Ensayos de Concreto

La preparación y ensayo de especímenes de concreto para determinar el cumplimiento de los requisitos del proyecto deben realizarse de acuerdo con los métodos de ensayo y prácticas especificadas en los documentos contractuales, como ASTM C31/C31M y ASTM C39/C39M. A estos ensayos también se les conoce como ensayos de aceptación. Un ensayo de resistencia a la compresión es la resistencia promedio de dos cilindros de concreto de 6 x 12 pulgadas o de tres cilindros de 4 x 8 pulgadas<sup>2</sup>.

Se asume que los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión para una clase dada de concreto siguen una distribución normal, comúnmente llamada "curva de campana". Esta suposición es apropiada en la mayoría de los casos si la resistencia del concreto no excede 10,000 psi<sup>3</sup>.

La Figura 1 muestra una curva típica de distribución normal de frecuencia, la cual indica la frecuencia de resultados de ensayo con diferentes valores de resistencia.

La distribución normal se define matemáticamente mediante dos parámetros estadísticos: la media poblacional  $\bar{X}$  y la desviación estándar  $s$  de las muestras, que es una medida de la variabilidad de los resultados de ensayo. La desviación estándar depende de variaciones en el material, fabricación y ensayo.

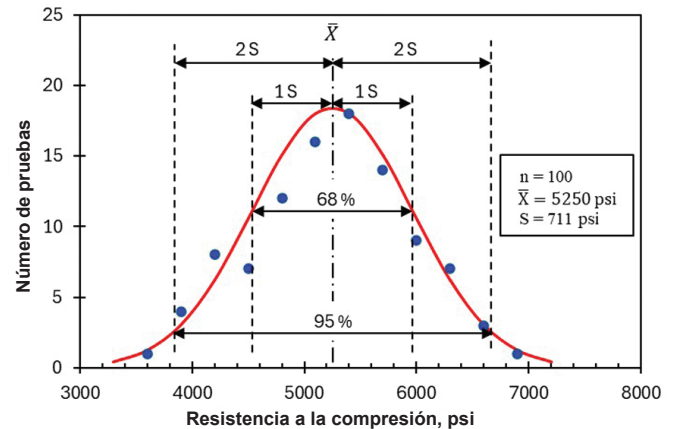


Figura 1. Curva de distribución normal para resultados de ensayos de resistencia

### Criterios de Aceptación de Resistencia del CÓDIGO ACI-318

La Sección 26.12.3.1<sup>2</sup> del Código de Construcción ACI establece que el nivel de resistencia de una mezcla de concreto será aceptable si se satisfacen los siguientes requisitos:

- Cada promedio de tres ensayos consecutivos de resistencia es igual o mayor que la resistencia especificada  $f'_c$ ; y
- Ningún ensayo de resistencia está por debajo de  $f'_c$  en más de 500 psi si  $f'_c$  es 5,000 psi o menos; o en más de  $0.10 f'_c$  si  $f'_c$  excede 5,000 psi.

Si alguno de estos dos requisitos no se satisface, deben tomarse medidas para aumentar los resultados de los ensayos de resistencia. Si no se cumple el segundo requisito, el resultado del ensayo de baja resistencia debe investigarse.

### ¿Qué es el sobrediseño?

Las investigaciones sobre resultados de ensayos de baja resistencia típicamente conducen a gastos considerables y demoras en el cronograma del proyecto. Estos problemas pueden reducirse



asegurando que la resistencia promedio sea mayor que la resistencia especificada.

La Tabla 4.2.3.3(a)1 de ACI SPEC-301-20 proporciona una manera de calcular la resistencia promedio requerida para tener una alta probabilidad de cumplir con los criterios de aceptación. Esta tabla establece que la mezcla propuesta debe dosificarse para producir una resistencia promedio mayor que los valores calculados mediante las siguientes ecuaciones:

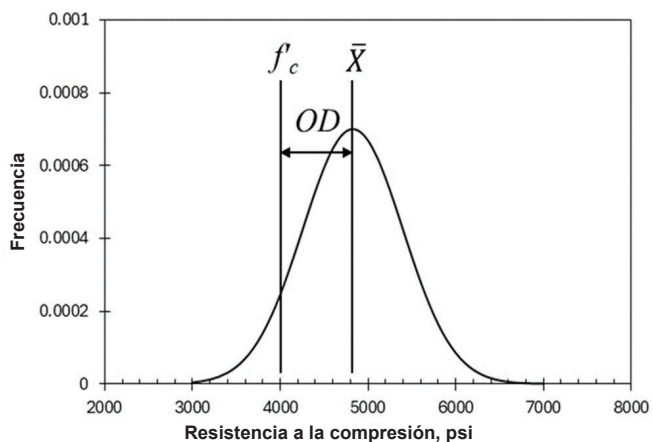
$$f'_{cr} = f'_c + 1.34ks \quad (1)$$

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33ks - 500 \text{ (si } f'_c \leq 5000 \text{ psi)} \quad (2a)$$

$$f'_{cr} = 0.90 f'_c + 2.33ks \text{ (si } f'_c > 5000 \text{ psi)} \quad (2b)$$

donde  $f'_{cr}$  es la resistencia promedio requerida para la mezcla;  $f'_c$  es la resistencia especificada indicada en las especificaciones; y  $k$  es el factor para incrementar la desviación estándar de la muestra  $s$ , si se consideran menos de 30 resultados de ensayo al calcular la desviación estándar. Los valores de  $k$  se proporcionan en la Tabla 4.2.3.3(a)2 de ACI SPEC-301-20.

La desviación estándar se determina a partir de los resultados de ensayos de resistencia obtenidos en proyectos anteriores para mezclas de concreto similares. Las Secciones 4.2.3.4(a) y 4.2.3.4(b) de ACI SPEC-301-20 establecen los requisitos para registros de resistencia anteriores. En ausencia de registros previos, la resistencia promedio requerida debe ser mayor que  $f'_c$  en un valor fijo que depende de  $f'_c$ , tal como se muestra en la Tabla 4.2.3.3(b) de ACI SPEC-301-20.



**Figura 2. Sobre diseño (OD) de la resistencia mostrado como la diferencia entre la resistencia especificada y la resistencia promedio alcanzada en el proyecto**

Las ecuaciones de ACI SPEC-301-20 se han desarrollado estadísticamente para garantizar que la probabilidad de no cumplir con los criterios de aceptación de resistencia del Código no sea mayor de uno en 100.

En resumen, en términos de la industria, el sobre diseño es la diferencia entre  $f'_c$  y la resistencia promedio alcanzada en el proyecto, como se muestra en la Figura 2. Como se explicará, el problema es que  $\bar{X}$  a menudo es mucho mayor que  $f'_{cr}$ . Además, siempre habrá una fracción de resultados de ensayo por debajo de la resistencia especificada.

## Ejemplo de Diseño

$f'_c = 4,000$  psi (de las especificaciones del proyecto)

$s = 412$  psi (calculado a partir de 30 resultados de ensayos recientes en la planta de producción para estas o similares proporciones de mezcla)

$k = 1.0$  (de la Tabla 4.2.3.3(a)2 de ACI SPEC-301-20)

Cálculo de la resistencia promedio requerida de la mezcla usando las ecuaciones (1) y (2a):

$$f'_{cr} = 4,000 + (1.34 \times 1.0 \times 412) = 4,550 \text{ psi}$$

$$f'_{cr} = 4,000 + (2.33 \times 1.0 \times 412) - 500 = 4,460 \text{ psi}$$

Se debe seleccionar el valor más alto. Por lo tanto, la resistencia promedio requerida para la mezcla sería de 4,550 psi. La presentación de la mezcla debe documentar que las proporciones propuestas de la mezcla de concreto producirán una resistencia a la compresión promedio igual o mayor a 4,550 psi. Así, el sobre diseño para cumplir con ACI SPEC-301-20 es de 550 psi, lo que garantiza una probabilidad del 99% de que se satisfagan los criterios de aceptación del CÓDIGO ACI-318-19(22).

Como se mencionó anteriormente, ha habido casos de sobre diseños superiores a 3,000 psi. Puede calcularse que cada incremento de 100 psi en la resistencia promedio contribuye aproximadamente a un aumento del 2% en carbono incorporado. Este cálculo se basa en la evaluación de ciclo de vida a nivel de industria de la Asociación Nacional de Concreto Premezclado (NRMCA, por sus siglas en inglés)<sup>4</sup>. Por lo tanto, reducir los valores excesivos de sobre diseño es deseable y beneficioso por varias razones, como se mencionó en la introducción.

En un proyecto dado, cuatro entidades distintas afectan la resistencia promedio del concreto. Estas son: el profesional facultado para diseñar (LDP, por sus siglas en inglés) que elabora las especificaciones,

el proveedor de concreto que produce el concreto de acuerdo con las especificaciones requeridas, el constructor que compra y coloca el concreto, y la entidad que realiza los ensayos y que muestrea y ensaya el concreto entregado en el lugar de trabajo. Cada una de estas entidades debe desempeñar su función para evitar sobre diseños innecesariamente altos.

## ¿Podemos Reducir el Sobre diseño?

### Profesional facultado para diseñar

El LDP determina la resistencia especificada del concreto en función de los requisitos del diseño estructural y asegura que el concreto tenga suficiente durabilidad. Los requisitos de durabilidad del concreto se encuentran en el Capítulo 19 del CÓDIGO ACI-318-19(22). Este capítulo define cuatro categorías de exposición (congelamiento y deshielo, exposición a sulfatos, contacto con agua y protección contra la corrosión del refuerzo) y varias clases de exposición basadas en la severidad de cada categoría de exposición. También define los requisitos del concreto para cada clase de exposición. El objetivo principal de estos requisitos es proporcionar suficiente resistencia a la penetración de agua y químicos disueltos que puedan causar fallos de durabilidad. Esto se aborda estipulando una relación máxima de agua/materiales cementantes ( $a/mc$ ) y un  $f'_c$  mínimo. Debido a que la  $a/mc$  no puede verificarse fácilmente durante la construcción, el requisito de resistencia sirve como criterio de aceptación. Tal como se indica en la Tabla 19.3.2.1 del CÓDIGO ACI-318-19(22), las relaciones  $a/mc$  y los requisitos de resistencia para diferentes clases de exposición son: 0.40 y 5,000 psi; 0.45 y 4,500 psi; 0.50 y 4,000 psi; y 0.55 y 3,500 psi. En resumen, el LDP selecciona un  $f'_c$  que cumpla con los requisitos de diseño estructural, así como con los requisitos de durabilidad.

Además de la resistencia y la  $a/mc$ , el CÓDIGO ACI-318-19(22) requiere que el LDP especifique un contenido de aire basado en el tamaño nominal máximo del agregado y en la clase de exposición a congelamiento y deshielo (Tabla 19.3.3.1). Los contenidos de aire especificados pueden reducirse en 1% si  $f'_c$  es igual o mayor a 5,000 psi (Sección 19.3.3.6).

Con frecuencia, el LDP especifica requisitos adicionales sobre los requisitos del CÓDIGO ACI-318. Algunos de estos y sus implicaciones en el sobre diseño se discuten a continuación.

### Requisitos mínimos de materiales cementantes:

Algunos LDP especifican un contenido mínimo de materiales cementantes. Por ejemplo, una especificación que requiere un contenido mínimo de materiales cementantes de 700 lb/yd<sup>3</sup> y una resistencia a compresión especificada de 4,000 psi puede resultar en una resistencia promedio superior a 7,000 psi, es decir, un sobre diseño de aproximadamente 3,000 psi. La implicación de este requisito de contenido mínimo de materiales cementantes, discutida en ACI PRC-329.1T-18, concluye que existen numerosos beneficios asociados con la eliminación de este requisito y la adopción de alternativas basadas en el desempeño en las especificaciones<sup>5</sup>.

### Interpretación excesivamente conservadora de los requisitos del Código:

El CÓDIGO ACI-318-19(22) estipula una relación máxima  $a/mc$  solo para las clases de exposición de durabilidad F1 a F3, S1 a S3, W2, y C2. Requerir una  $a/mc$  baja para concreto que no está sujeto a estas clases de exposición de durabilidad o exigir una  $a/mc$  inferior a la justificada por la clase de exposición de durabilidad resultará en resistencias promedio más altas. Por ejemplo, para concreto sin requisitos de exposición a durabilidad, no es inusual ver un  $f'_c$  de 4,000 psi, una  $a/mc$  máxima de 0.40 y sin aire incorporado. La resistencia promedio a compresión para dicha mezcla probablemente sea superior a 7,500 psi, es decir, un sobre diseño de 3,500 psi. Esto es aproximadamente de tres a cinco veces el sobre diseño necesario para tener una alta probabilidad de cumplir con los criterios de aceptación de resistencia, dependiendo de la variabilidad de la producción.

El CÓDIGO ACI-318-19(22) requiere contenido de aire incorporado solo para las clases de exposición de durabilidad F1 a F3. Una columna sujeta a la clase de exposición F1 requiere un contenido de aire entre 3.5 y 6.0%, dependiendo del tamaño del agregado (Tabla 19.3.3.1). Si el LDP desea ser conservador y selecciona un contenido de aire objetivo de 6.5%, puede haber una pérdida de resistencia de entre 10% y 30%, con un mayor porcentaje de pérdida de resistencia para concretos de alta resistencia<sup>6</sup>. Especificar contenidos de aire que excedan el requisito del Código resulta en mezclas con una mayor huella de carbono. Los investigadores no coinciden en la necesidad de incorporar aire en concretos de alta resistencia<sup>6</sup>. Dado que la pérdida de resistencia es mayor para concreto

de alta resistencia, el contenido de aire requerido por el Código no debe excederse en columnas de concreto de alta resistencia.

En caso de una investigación de baja resistencia, el CÓDIGO ACI-318-19(22) requiere que, si es necesario extraer núcleos, se tomen tres núcleos del área de concreto sospechosa de baja resistencia. La resistencia promedio de los tres núcleos debe ser al menos el 85% de  $f'_c$ , sin que la resistencia de ningún núcleo sea inferior al 75% de  $f'_c$  (Sección 26.12.6.1). Los autores han observado especificaciones de proyectos que requieren que los núcleos de concreto excedan el 100% de la resistencia especificada. Este tipo de especificaciones tiende a incrementar el sobre diseño para reducir la probabilidad de tener que realizar investigaciones de baja resistencia. El ACI E702.8-22 proporciona una guía para evaluar los resultados de los ensayos de concreto de acuerdo con el Código mediante tres casos de estudio<sup>7</sup>.

### **Falta de conocimiento sobre los criterios de aceptación de ACI para especímenes:**

Como se mencionó anteriormente, de acuerdo con la Sección 26.12.3.1 del CÓDIGO ACI-318-19(22), las investigaciones de baja resistencia solo son necesarias si un resultado de prueba individual está por debajo de  $f'_c$  en 500 psi para  $f'_c$  menores a 5,000 psi o en  $0.10 f'_c$  si  $f'_c$  supera los 5,000 psi. Recordemos que un resultado de prueba de resistencia es la resistencia promedio de dos cilindros de 6 x 12 pulgadas o tres de 4 x 8 pulgadas.

Uno de los autores fue contactado por un LDP sobre la realización de una investigación de baja resistencia cuando un cilindro de un resultado de prueba estuvo por debajo de  $f'_c$  o cuando un resultado de prueba estuvo por debajo de  $f'_c$ , pero no en 500 psi. Estas malas interpretaciones de los requisitos del Código conducen invariablemente a retrasos en el proyecto, mayores costos y disputas. Para reducir la probabilidad de tales disputas innecesarias, el productor de concreto puede optar por usar un sobre diseño mayor al necesario.

### **No diseñar los elementos estructurales para la resistencia real del concreto:**

A veces, el LDP puede reducir la cantidad de clases de resistencia para evitar complejidad. Esto resulta en que algunas partes de la estructura tengan una resistencia a compresión mucho mayor que la requerida por seguridad. Alternativamente, la resistencia a compresión requerida para cumplir con las clases de exposición del Código para durabilidad puede ser mayor que la resistencia a

compresión utilizada para el diseño estructural. En tales situaciones, los elementos estructurales deberían diseñarse para aprovechar la mayor resistencia requerida para la durabilidad, lo cual puede llevar a tamaños de elementos reducidos, lo que a su vez reducirá la carga muerta y la huella de carbono.

Algunos elementos estructurales, como las cimentaciones, pueden no tener que resistir cargas de diseño durante varios meses después de ser construidos. En estas situaciones, puede ser prudente especificar la resistencia a 56 días. Alternativamente, se puede desarrollar una relación de resistencia versus edad, y se puede aceptar una resistencia de 28 días menor si el curado es adecuado para asegurar el desarrollo de la resistencia requerida.

Algunos LDP determinan las resistencias promedio requeridas de acuerdo con la Tabla 4.2.3.3(b) de ACI SPEC-301-20, incluso si existen datos previos de ensayos de resistencia. Esto requiere un sobre diseño de 1,200 psi para  $f'_c$  de 4,000 psi, que en la mayoría de los casos será mayor que el sobre diseño calculado si se dispone de datos previos.

La Publicación 2PE004-21<sup>8</sup> de NRMCA ofrece varias sugerencias sobre cómo los LDP pueden mejorar las especificaciones y asegurar un mejor desempeño y sostenibilidad.

## **Contratista**

### **Requisito de alta resistencia temprana:**

Para el rápido avance de las operaciones de construcción, como el descimbrado o la aplicación de postensado, puede requerirse una alta resistencia temprana. Un requisito arbitrario de resistencia de 75% de  $f'_c$  a los 2 o 3 días puede traducirse en una resistencia superior a 7,000 psi a los 28 días, aunque solo se requieran 4,000 psi según el diseño estructural. Así, la consecuencia no intencionada de requerir una alta resistencia temprana arbitraria será un sobre diseño excesivo de la mezcla de concreto. Los requisitos de resistencia temprana deben basarse en las cargas de diseño tempranas reales, en lugar de un requisito arbitrario como el 75% de  $f'_c$  a los 3 días.

## **Agencia de ensayos (laboratorio de pruebas)**

**Curado inicial en la obra:** La Sección 26.12.1.1 del CÓDIGO ACI-318-19(22) requiere que los especímenes de ensayo preparados para pruebas de aceptación de  $f'_c$  estén sujetos a curado estándar de acuerdo con ASTM C31/C31M. La resistencia de los cilindros curados estándar no representa

la resistencia in situ del concreto en la estructura, pero sirve como base para evaluar la suficiencia del concreto entregado al proyecto. El curado estándar de los especímenes de ensayo consiste en el curado inicial en la obra, transporte al laboratorio y curado final en la agencia de ensayos (laboratorio de pruebas). Se especifican condiciones aceptables para cada fase. La parte de curado inicial implica almacenar los especímenes durante un periodo de hasta 48 horas en un ambiente que mantenga una temperatura de curado entre 15.6 y 26.7°C (60 y 80°F) y controle la pérdida de humedad de los especímenes. Para mezclas de concreto con  $f'_c$  de 6,000 psi o más, la temperatura de curado inicial debe estar entre 20 y 25.6°C (68 y 78°F).

La Sección 1.7.2.2(c) de ACI SPEC-301-20 requiere que el contratista proporcione electricidad y espacio para almacenar los cilindros mientras están en el sitio de construcción. ACI PRC-132-14 establece que el LDP debe definir las responsabilidades para el curado inicial en los documentos de construcción, y la agencia de ensayos (laboratorio de pruebas) debe incluir el costo del curado inicial en la oferta de servicios de ensayo<sup>9</sup>. Sin embargo, en la mayoría de los proyectos, los cilindros no están sujetos a curado inicial conforme a ASTM C31/31M<sup>10</sup>. En muchos proyectos, hemos observado cilindros dejados sin protección a temperaturas superiores a 32°C (90°F) o en condiciones de congelamiento. Varios estudios han demostrado que, si los cilindros no están sujetos a un curado inicial adecuado, la pérdida de resistencia puede ser de aproximadamente un 20% en comparación con cilindros sometidos a curado estándar<sup>11,12</sup>. Un problema adicional es que muchas obras están aseguradas y cerradas los fines de semana. Los cilindros de concreto moldeados el viernes no pueden recogerse hasta el lunes (si el lunes es un día festivo, se recogerían el martes). Esto da como resultado que los cilindros permanezcan en el sitio de construcción más de las 48 horas asignadas.

Dado que las condiciones en el sitio de construcción pueden ser desconocidas al desarrollar las proporciones de la mezcla, el productor de concreto puede incrementar el sobre diseño para compensar posibles omisiones en el seguimiento de los procedimientos estándar de curado de los especímenes.

**Falta de cumplimiento de los estándares de ensayo:** Algunos interesados (pueden ser los propietarios, LDP o contratistas) ven el ensayo solo desde un punto de vista de costo y no como un servicio profesional. Aunque la Sección 26.12.1.1 del CÓDIGO ACI-318-19(22) establece que se

requieren agencias de ensayo (laboratorios de pruebas) certificadas y técnicos certificados para probar el concreto, esto no siempre se cumple en los proyectos. La selección de la agencia de ensayos (laboratorios de pruebas) a menudo se basa en una oferta baja en lugar de en las calificaciones. Hay poca o ninguna supervisión de los servicios de ensayo, siempre y cuando no se identifiquen problemas. Durante los seminarios en el país, escuchamos quejas de que hay una agencia de ensayos (laboratorios de pruebas) en el área que es una empresa de gran volumen y baja calidad. En muchos casos, los contratistas y productores de concreto no confrontan a estas agencias problemáticas porque pueden tener que trabajar con ellas en futuros proyectos. Si la entidad que contrata a la agencia de ensayos (laboratorios de pruebas) no garantiza la calidad de los ensayos, el productor puede optar por sobre diseñar en exceso el concreto para considerar la posibilidad de ensayos deficientes.

**Incapacidad del productor de concreto para obtener resultados de ensayos:** Los resultados de los ensayos de concreto a menudo no se envían rutinariamente a los productores de concreto, a menos que se trate de resultados de baja resistencia. Esto impide que los productores de concreto observen las tendencias de los resultados de resistencia y ajusten la mezcla para evitar sobre diseño excesivo o investigaciones de baja resistencia. Los productores de concreto quedan “a ciegas” y, para protegerse, sobre diseñan las mezclas de concreto.

ACI SPEC-301-20, ACI SPEC-311.6-18<sup>13</sup> y el AIA MasterSpec<sup>14</sup> establecen que el productor de concreto tiene derecho a recibir los informes de los ensayos de resistencia de manera oportuna. Aunque las agencias de ensayos tienen el contrato de enviar informes de prueba a las personas identificadas en sus contratos, tienen la responsabilidad de informar a sus clientes sobre los requisitos de ACI para compartir los informes de prueba con el productor.

## Productor de concreto

**Interpretaciones racionales del Código:** Dado que los datos de ensayos de resistencia del concreto típicamente siguen una distribución normal, siempre existe la probabilidad de un resultado de ensayo fallido, independientemente de la resistencia promedio. Sin embargo, cuanto mayor es la resistencia promedio, menor es la probabilidad de un resultado de ensayo fallido. Dado que una empresa típica de concreto realiza ensayos de su concreto miles de veces al año, una probabilidad de

un resultado fallido en cada 100 garantiza múltiples resultados bajos en un año. Esto podría ser un problema costoso que el productor de concreto preferiría evitar, lo que conduce a la producción de concreto con un sobre diseño excesivo, de manera que la probabilidad de tener resultados fallidos sea mucho menor que uno en cada 100 ensayos.

Las ecuaciones de ACI SPEC-301-20 para calcular la resistencia promedio requerida se basan en una probabilidad de que uno de cada 100 ensayos falle en los criterios de aceptación. Sin embargo, la Sección 26.12.3.1 del CÓDIGO ACI-318-19(22) requiere una investigación de baja resistencia si no se cumple el segundo criterio de aceptación (Ecuaciones (2a) y (2b)).

No obstante, dado que algunos resultados de baja resistencia son inevitables, el LDP debe usar juicio de ingeniería. El LDP debe determinar si existe una deficiencia real en la resistencia antes de iniciar un programa de extracción de núcleos. Si se confirma la probabilidad de concreto de baja resistencia y los cálculos indican que la adecuación estructural se reduce significativamente, se pueden considerar pruebas de núcleos. La Publicación No. 133 de NRMCA proporciona un enfoque paso a paso para llevar a cabo investigaciones de resultados de ensayos de baja resistencia<sup>15</sup>. Describe los pasos que el equipo del proyecto puede tomar antes de extraer núcleos de la estructura.

### **Incapacidad para cambiar las proporciones de la mezcla:**

Una vez que una mezcla propuesta ha pasado por el proceso de aprobación en varios pasos, puede ser difícil obtener aprobación para hacer un cambio. Por lo general, una mezcla aprobada se utilizará durante todo el proyecto. Esto significa que, en un proyecto a largo plazo, el productor de concreto necesitaría diseñar para las peores condiciones en cuanto a la calidad de los materiales, fabricación y ensayo. Así, en la mayoría de las situaciones, la mezcla estará sobre diseñada, excepto si ocurren las peores condiciones.

La Sección R26.12.3.1(b) del CÓDIGO ACI-318-19(22) enumera varias razones por las cuales puede ser necesario o beneficioso ajustar las mezclas de concreto durante el transcurso de un proyecto. El Código establece que se debe presentar al LDP evidencia aceptable para demostrar que la mezcla modificada cumple con los requisitos en los documentos de construcción. La práctica de la industria es calcular un valor psi/lb (resistencia a compresión por libra de material cementante) y ajustar los contenidos de materiales cementantes para acomodar pequeños cambios en la resistencia.

Este enfoque solo funciona si las fuentes de material no cambian. Algunas agencias (laboratorios) pueden permitir pequeños cambios en las mezclas sin requerir una presentación. Por ejemplo, el Departamento de Transporte de Florida permite que el contenido de materiales cementantes varíe  $\pm 6.5\%$  sin requerir presentación<sup>16</sup>. Las dosificaciones de aditivos también pueden variarse. Esto permite al productor de concreto ajustar las mezclas a medida que cambian las condiciones del trabajo y evitar la dosificación para la peor condición posible.

### **Problemas de control de calidad:**

El contenido de agua de mezclado en una batchada puede variar debido a una cantidad desconocida de agua de lavado presente en el tambor de la mezcladora antes de la dosificación, determinaciones incorrectas de la humedad del agregado, cantidades incorrectas de agua de dosificación y agua añadida en el punto de lavado y en el sitio de trabajo. Por estas razones, no se conoce la cantidad exacta de agua y la relación  $a/mc$  no puede calcularse con precisión. Una relación  $a/mc$  variable puede llevar a una variabilidad en la resistencia del concreto.

Además de la variación en el agua de mezclado, puede haber variabilidad debido a los materiales, fabricación y ensayo. En proyectos a largo plazo, puede haber personal diferente realizando estas funciones, lo que añade a la variabilidad.

La Tabla 1 muestra los sobre diseños calculados para varios estándares de control de concreto de ACI PRC-214-11(19) para concreto con  $f'_c = 4,000$  psi<sup>17</sup>.

Al reducir la desviación estándar de 1,500 a 450 psi, el sobre diseño puede reducirse de 3,000 a 600 psi.

Curiosamente, si un productor desea ser conservador y diseñar las mezclas para una probabilidad de falla de una en 1,000 (10 veces menos riesgoso que ACI SPEC-301-20), deberá aumentar el sobre diseño en solo 290 psi si la desviación estándar es 450 psi, pero aumentar el sobre diseño en 1,140 psi si la desviación estándar es de 1,500 psi. Entonces, alcanzar una desviación estándar más baja proporcionará un aumento sustancial en la reducción del riesgo para un aumento menor en el sobre diseño, lo cual es en el mejor interés de todos los interesados, incluido el propietario.

Algunos productores pueden optar por usar un sobre diseño excesivo en lugar de mejorar las prácticas de calidad del concreto. Este enfoque puede desalentarse al exigir que los productores tengan personal, plantas y camiones que estén

calificados según los requisitos del Departamento de Transporte local (DOT) o NRMCA. Las prácticas de calidad mejoradas que apuntan a una desviación estándar más baja y a un sobre diseño menor se ven penalizadas por especificaciones de concreto que requieren materiales cementantes mínimos o requisitos innecesarios de  $a/mc$  máximo, o ambos.

## Conclusiones

El sobre diseño de mezclas de concreto es una parte necesaria para producir concreto de calidad que cumpla con los criterios de aceptación. Los requisitos de resistencia promedio en ACI SPEC-301-20 proporcionan valores aceptables de sobre diseño. Sin embargo, como se ha discutido en este artículo, existen muchas razones por las cuales los sobre diseños más altos son comunes. No obstante, el sobre diseño excesivo conlleva mayores costos, menor durabilidad del concreto y no es favorable para el medio ambiente. Para evitar sobre diseños innecesariamente altos, ofrecemos las siguientes recomendaciones:

- Evitar especificar contenidos mínimos de materiales cementantes en las especificaciones del proyecto;
- Especificar la máxima  $a/mc$  que requiere el CÓDIGO ACI-318 para las clases de exposición aplicables. No especifique una  $a/mc$  máxima más baja;
- Especificar el contenido de aire solo si las clases de exposición del CÓDIGO ACI-318 lo requieren y no especifique un contenido de aire más alto que el requerido por el Código. Esto es particularmente importante para concreto de alta resistencia;
- Sea claro en las especificaciones en que se aplican diferentes criterios de aceptación de resistencia del CÓDIGO ACI-318 para las resistencias de cilindros y núcleos. Requisitos arbitrarios, ambiguos o más estrictos resultan en altos sobre diseños;
- Use registros de pruebas de resistencia en

campo si están disponibles para calcular la resistencia promedio requerida;

- Requerir alta resistencia temprana solo si es necesario. Los requisitos de resistencia temprana deben basarse en las cargas de diseño tempranas en lugar de requisitos arbitrarios como el 75% de  $f'_c$  a los 3 días. Si la resistencia
  - a los 28 días será mayor debido a los requisitos de alta resistencia temprana o consideraciones de exposición de durabilidad, aproveche la mayor resistencia en el diseño estructural;
  - Asegurarse de que los especímenes de prueba de concreto se curen y prueben de acuerdo con las normas aplicables, en particular su curado inicial, que a menudo se pasa por alto. Asegúrese de que los inspectores supervisen el curado inicial de los especímenes en el sitio de trabajo;
  - Asegurarse de que las agencias de ensayo (laboratorios de pruebas) que realizan las pruebas de aceptación cumplan con ASTM C1077 y que los técnicos que ensayan el concreto tengan certificaciones de campo o laboratorio de ACI;
  - Asegurarse de que todas las partes interesadas, en particular los productores de concreto, reciban los resultados de las pruebas de aceptación de concreto de manera oportuna;
  - Siempre existe la posibilidad de que un pequeño número de resultados de ensayo no cumplan con los criterios de aceptación del CÓDIGO ACI-318, incluso si el sobre diseño cumple con los requisitos del proyecto. El LDP debe usar juicio de ingeniería para evaluar la importancia de los resultados de baja resistencia;
  - Permitir que los contenidos de materiales cementantes y las dosificaciones de aditivos varíen dentro de un rango especificado sin requerir una nueva presentación de mezcla; y

**Tabla 1:**  
Sobre diseño calculado para control de calidad de concretos de más de 4,000 psi de  $f'_c$ , bajo diversas condiciones de control.

| Estándares de calidad (ACI PRC-214-11(19)) | Excelente | Muy bien | Bien  | Justo | Pobre | Pobre | Pobre |
|--|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $s$ , psi                                  | 350       | 450      | 550   | 650   | 750   | 1,200 | 1,500 |
| $f'_c$ (ACI SPEC-301-20), psi              | 4,470     | 4,600    | 4,780 | 5,020 | 5,250 | 6,300 | 7,000 |
| Sobrediseño, psi                           | 470       | 600      | 780   | 1,020 | 1,250 | 2,300 | 3,000 |

- Los productores de concreto deben seguir buenas prácticas de control de calidad y esforzarse por tener una baja desviación estándar y un bajo sobre diseño. Asegúrese de que los productores tengan personal, plantas y camiones calificados de acuerdo con los requisitos locales de DOT o NRMCA.

Aunque hemos identificado varios enfoques para reducir el sobre diseño del concreto, implementar solo algunos de ellos puede resultar en reducciones sustanciales. De alguna manera, los enfoques van de la mano. Por ejemplo, las especificaciones basadas en el desempeño (primeros dos puntos) y las pruebas de acuerdo con las normas (el séptimo punto) motivarán a los productores a mejorar el control de calidad y a alcanzar una desviación estándar más baja, lo que permite un sobre diseño menor. Si se llevan a cabo muchos de los pasos sugeridos anteriormente, un sobre diseño razonable puede rondar los 800 psi para concreto con un  $f'_c$  inferior a 5,000 psi, en lugar de los 1,500 a 3,000 psi que se utilizan actualmente en muchos proyectos.

## Referencias

1. ACI Committee 301, "Specifications for Concrete Construction (ACI SPEC-301-20)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 69 pp.
2. 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.
3. Cook, J.E., "Research and Application of High-Strength Concrete Using Class C Fly Ash," Concrete International, V. 4, No. 7, July 1982, pp. 72-80.
4. "A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Ready-Mixed Concrete Manufactured by NRMCA Members – Version 3.2," Athena Sustainable Materials Institute, Ottawa, ON, Canada, 2022, 101 pp., [https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2022/02/NRMCA\\_LCARReportV3-2\\_20220224.pdf](https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2022/02/NRMCA_LCARReportV3-2_20220224.pdf).
5. ACI Committee 329, "Minimum Cementitious Materials Content in Specifications (ACI PRC-329.1T-18)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2018, 4 pp.
6. ACI Committee 363, "Report on High-Strength Concrete (ACI PRC-363-10)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010, 65 pp.
7. ACI Committee E702, "Designing Concrete Structures: Evaluation of Concrete Cores Test Results According to ACI 318-19 (ACI E702.8- 22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2022, 8 pp.
8. "Guide to Improving Specifications for Ready Mixed

Concrete," NRMCA Publication 2PE004-21, National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2021, 37 pp., <https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2020/10/GuideToSpecs.pdf>.

9. ACI Committee 132, "Guide for Responsibility in Concrete Construction (ACI PRC-132-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 11 pp.
10. "Concrete Testing Adherence Collaboration," Colorado Ready Mixed Concrete Association (CRMCA), Centennial, CO, <https://www.concretetac.com/>, accessed Apr. 12, 2024.
11. Obla, K.H.; Werner, O.R.; Hausfeld, J.L.; MacDonald, K.A.; Moody, G.D.; and Carino, N.J., "Who is Watching Out for the Cylinders?" Concrete International, V. 40, No. 8, Aug. 2018, pp. 28-35.
12. "Reliable Concrete Acceptance Testing for Improved Sustainability and Performance," NRMCA Position Statement, National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2024, 2 pp., [https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/NRMCA\\_Position\\_Statement.pdf](https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/NRMCA_Position_Statement.pdf).
13. ACI Committee 311, "Specification for Testing Ready-Mixed Concrete (ACI SPEC-311.6-18)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2018, 5 pp.
14. "AIA MasterSpec: Section 033000 – Cast-in-Place Concrete," American Institute of Architects, Washington, DC, 2023, 64 pp.
15. "In-Place Concrete Strength Evaluation—A Recommended Practice," NRMCA Publication No. 133, National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2011, 10 pp.
16. "Materials Manual," Volume II, Section 9.2.6.3.1, revised July 2024, Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL, [https://fdotwww.blob.core.windows.net/sitefinity/docs/default-source/programmanagement/implemented/urlinspecs/july24/section92v2-724clnaede6fc2-255d-477f-8e3e-081b29cb864d.pdf?sfvrsn=4154e834\\_1](https://fdotwww.blob.core.windows.net/sitefinity/docs/default-source/programmanagement/implemented/urlinspecs/july24/section92v2-724clnaede6fc2-255d-477f-8e3e-081b29cb864d.pdf?sfvrsn=4154e834_1).
17. ACI Committee 214, "Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI PRC-214R-11) (Reapproved 2019)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 16 pp.

Nota: Información adicional sobre las normas ASTM discutidas en este artículo se puede encontrar en [www.astm.org](http://www.astm.org).

Miembro Honorario del ACI **Luke M. Snell** es Consultor de Concreto y Profesor Emérito en la Universidad del Sur de Illinois en Edwardsville, Edwardsville, IL, EE.UU. Fue miembro y presidente anterior de los Comités ACI 120, Historia del Concreto, y E702, Diseño de Estructuras de Concreto. También es miembro de los Comités ACI C630, Certificación de Inspectores de Construcción, y C801, Competiciones Estudiantiles. Es ingeniero profesional licenciado en Missouri.



Miembro Honorario del ACI **Nicholas J. Carino** se jubiló del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología después de 25 años de servicio como Ingeniero Estructural de Investigación. Ha sido parte de varios comités de ACI, incluyendo E707, Educación en Especificaciones; 228, Ensayos No Destructivos de Concreto; 301, Especificaciones para Construcción de Concreto; 329, Criterios de Desempeño para Concreto Premezclado; 437, Evaluación de la Estructura de Concreto Existente; y 562, Rehabilitación de la Reparación de Estructuras de Concreto; y el Subcomité ACI 318-A, General, Concreto y Construcción. Carino es también miembro de varios comités de ASTM y ha servido como presidente del Comité C09 de ASTM, Concreto y Agregados de Concreto.



**Karthik H. Obla**, F.ACI, es vicepresidente Senior de Servicios Técnicos en la Asociación Nacional de Concreto Premezclado (NRMCA), en Alexandria, VA, EE.UU. Es presidente del Comité ACI 214, Evaluación de Resultados de Pruebas para Determinar la Resistencia del Concreto, y miembro y ex-presidente del Comité ACI 232, Cenizas Volantes y Cenizas de Fondo en el Concreto; y miembro de los Comités ACI C690, Certificación de Gerente Técnico de Calidad del Concreto; 201, Durabilidad del Concreto; 211, Proporción de Mezclas de Concreto; 236, Ciencia de los Materiales del Concreto; 240, Puzolanas; 329, Criterios de Desempeño para Concreto Premezclado; 365, Predicción de la Vida Útil del Servicio; y 555, Concreto con Materiales Reciclados. Ha trabajado como presidente del Subcomité C09.49 de ASTM, Concreto Poroso. Obla tiene un BTech en ingeniería civil del Instituto Indio de Tecnología (IIT) BHU Varanasi, Varanasi, Uttar Pradesh, India, y su MS y PhD en ingeniería civil de la Universidad de Michigan, Ann Arbor, MI, EE.UU. Obla es ingeniero profesional licenciado en Maryland.





Título original en inglés:  
**Excessive Overdesign of  
Concrete Mixtures for  
Strength—Causes and Solutions**

**La traducción de este artículo  
correspondió al Capítulo Ecuador**



*Traductor:*  
**Ing. Jorge  
Campoverde**



*Revisor Técnico:*  
**Ing. Santiago Velez  
Guayasamín, MSc  
DIC**