

# Expect Compressive Strength Test Results Less Than Specified Strength on Every Project

Use engineering judgment, test reserve cylinders, and extract cores only if evaluation is warranted

by James Klinger, Colin L. Lobo, Eamonn F. Connolly, and Bruce A. Suprenant

**S**urprised by the title? On every project, experienced concrete industry professionals recognize that individual compressive strength test results can be lower than the specified strength,  $f'_c$ . While there are numerous reasons this might occur, one important reason is: the standards for acceptance criteria used in the United States are based on statistical concepts that permit a low test result, and it is standard practice for concrete producers to design concrete mixtures based on a probability of about 10% that an individual strength test may be less than  $f'_c$ .<sup>1-3</sup> This is done such that the owner benefits from an economical and sustainable concrete mixture that complies with the ACI 318-19 Code<sup>4</sup> and represents limited risk to structural performance considering the use of safety and resistance factors in design. When a compressive strength test result is substantially less than  $f'_c$ , engineering judgment, use of reserve cylinders, and, if necessary, evaluation of extracted cores assist in resolving the issue.

## Is it Normal for a Strength Test to be Less than $f'_c$ and How Often?

An individual compressive strength test result less than  $f'_c$  is acceptable in accordance with the Code.<sup>3,5,6</sup> The strength acceptance criteria in Section 26.12.3.1 of ACI 318-19 state that strength test results are acceptable if:

- The average of three consecutive tests equals or exceeds  $f'_c$ ; and
- Each individual test exceeds  $(f'_c - 500 \text{ psi})$  or  $0.9f'_c$ , if  $f'_c$  exceeds 5000 psi.

ACI 301-20, Section 4.2.3.3,<sup>1</sup> establishes the process of determining the required average strength,  $f'_{cr}$ , at a 99% probability of compliance (strength tests can fail the criteria at a 1% probability).

Relative to the first criteria for acceptable strength test results,  $f'_{cr}$  should be at least  $1.34s_s$  greater than  $f'_c$ , where  $s_s$  is the standard deviation of at least 30 strength tests of the same class of concrete from a previous project. In a statistical normal distribution, the factor 1.34 indicates that about 10% of individual strength tests can be less than  $f'_c$ .

ACI 318-19, Section 26.12.2.1, and ACI 301-20, Section 1.7.3.3(d), establish the same minimum frequency of compressive strength testing at one test for each 150 yd<sup>3</sup> of concrete. ACI 301 is usually referred to in the Project Specifications and by the AIA MasterSpec<sup>®</sup> Section 033000-Cast-in-Place Concrete.<sup>7</sup> Some project specifications call for tests at a higher frequency, typically at one test per 100 yd<sup>3</sup> of concrete. Table 1 shows how often the measured compressive strength test is likely to be below  $f'_c$  based on statistical concepts for testing frequency at one test per 100 or 150 yd<sup>3</sup> of concrete.

For a project with 10,000 yd<sup>3</sup> of concrete, expect seven to 10 tests less than  $f'_c$ . On a large project with 100,000 yd<sup>3</sup> of concrete, this number is 67 to 100. If this is not observed, the concrete mixture is overdesigned more than that required by ACI 301. This can be related to prescriptive requirements where a maximum water-cementitious materials ratio ( $w/cm$ ) is not consistent with  $f'_c$  or a minimum cement content is specified. Some producers also increase strength of mixtures to avoid problems associated with testing.

**Table 1:**  
**Expected number of compressive strength test results less than  $f'_c$**

Volume of placed concrete, yd <sup>3</sup>	Minimum number of tests		Expected number of tests less than $f'_c$	
	One per 150 yd <sup>3</sup> (ACI 318-19, ACI 301-20)	One per 100 yd <sup>3</sup>	One per 150 yd <sup>3</sup> (ACI 318-19, ACI 301-20)	One per 100 yd <sup>3</sup>
1000	7	10	1	1
10,000	70	100	7	10
50,000	334	500	34	50
100,000	667	1000	67	100

When strength test results are lower than  $f'_c$ , it is possible that the failure may be in the testing and not representative of the delivered concrete. This is especially true when the fabrication, handling, curing, and testing of the cylinders are not conducted in accordance with relevant ASTM standards. Testing issues can therefore complicate how many test results will be less than  $f'_c$  and, more importantly, if the strength test results are representative of the delivered concrete.

When strength tests fail to meet the ACI 318 acceptance criteria, steps must be taken to increase subsequent strength tests. Guidance on steps to increase future strength tests is provided in the Commentary Section R26.12.3.1(b) of ACI 318-19. A more relevant suggested sequence of evaluation is described by the National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA).<sup>8</sup> If an individual strength test fails to meet the second criteria in ACI 318-19 for acceptable strength test results, then the Code requires a low-strength investigation.

Testing agencies fail to recognize that a compressive strength test can be less than  $f'_c$  and still comply with the acceptance criteria in the Code. Regrettably, the test agency marks the test report as “failed” or “rejected,” both of which are inappropriate characterizations. First, the test did not fail acceptance criteria in the Code and second, the testing agency does not have the authority to accept or reject. This misleading information often creates unnecessary confusion, cost, and delays. This issue should be discussed at the preconstruction meeting. Some testing agencies believe they should alert the owner or design team if the measured strength on a single cylinder at 7 days does not achieve some assumed percentage of the specified 28-day strength. This practice could cause unnecessary panic and should be avoided because there is typically no requirement at 7 days, testing one cylinder is not a valid test, and each mixture has a unique rate of strength gain.

### It Costs Less to be Less than $f'_c$ —Owner Benefits

What is the cost if no strength tests can be less than  $f'_c$ ? If  $f'_c$  is the absolute minimum strength, the mixture must be designed for a strength level at least three standard deviations greater than  $f'_c$ . This will require at least 50 lb higher cement content in each cubic yard of concrete. This could increase the

concrete cost up to about \$15 per cubic yard. For a project with 10,000 yd<sup>3</sup> of concrete, the additional concrete cost would be \$150,000. And on a large project with 100,000 yd<sup>3</sup> of concrete, the additional concrete cost would be \$1,500,000. That is the benefit the owner receives based on allowing some strength tests below  $f'_c$ . With an increased cement content, there can also be adverse performance issues such as increased potential for cracking due to higher shrinkage or thermal effects. In this era of green construction, increasing the strength of concrete also increases its carbon footprint and makes it more difficult to achieve project goals for sustainability.

### Use Test Cylinders Wisely—Discuss at Preconstruction Meeting

During the preconstruction meeting, the engineer should provide direction to the testing agency regarding appropriate actions when strength test results are less than  $f'_c$ . Typically, a set of four to six cylinders are cast from a concrete sample (Fig. 1). Preferably, additional “hold” cylinders are available to test at a later age if needed (Fig. 2).

The specifics of reserve or hold cylinders are discussed in a later section. It should, however, be noted that these cylinders should be used prior to core tests because the design team felt it prudent to require reserve or hold cylinders in the project specifications and the owner felt it beneficial to pay for them. Deciding to core adds an extra cost without gaining the benefit of additional information from reserve cylinders that are already paid for.

One additional testing item should be discussed, as per NRMCA CIP 35 recommendations: “If one or both of a set of cylinders break at strength less than  $f'_c$ , evaluate the cylinders for obvious problems and hold the tested cylinders for later examination.”<sup>9</sup> This is generally common practice at a testing agency; however, it should be discussed to make sure the cylinders are available for examination. Often, just measuring the weight of a cylinder before testing to calculate an approximate density can be useful to determine if there was improper consolidation, embedded foreign objects, or other problems.

Sometimes engineers are reluctant or refuse to consider the information provided by the reserve or hold cylinders. If that is the case, a conversation with the owner should take place



**Fig. 1:** Typically, four to six 6 x 12 in. concrete cylinders are cast at the jobsite to fulfill project specification requirements (photo courtesy of PCA)

prior to construction. The owner only wants to pay to receive a benefit and, if the reserve or hold cylinders do not do so, they should be removed from the testing contract.

### Investigating Low Strength Test Results

ACI 318 and ACI 301 provide requirements when a low strength test must be investigated. Engineering judgment should be used to determine the scope of the investigation to verify if corrective action is necessary. First, ask yourself: if the test result is true, does it matter?

Section 26.12.6.1, Part (b), of ACI 318-19 requires the engineer to consider if “calculations indicate that structural adequacy is significantly reduced.” If the low test result is adequate, why spend time and money determining the root cause? A root cause analysis should be considered, however, when there are more than the anticipated number of low strength results based on accepted statistical principles.

The engineer has tools for investigating a low strength test result, including: 1) using experienced engineering judgment; 2) assessing testing variations from standards; 3) supplementary data from reserve or hold cylinder testing; 4) nondestructive testing for a relative assessment; and 5) core testing using the criteria for core strength in ACI 318.

### Engineering judgment

ACI 318-19 uses the word “judgment” 16 times in the document. The first instance included in the Introduction might be the most important: “The Code and Commentary cannot replace sound engineering knowledge, experience, and judgment.” Commentary Section R26.12.6.1 in ACI 318-19

FIELD AND LAB DATA	Date:	5/28/2010	Time Concrete Batched:	8:10 AM	Time Concrete Sampled <sup>1</sup> :	8:35 AM	Sampled By:	KT	
	Concrete Truck No.:	24453	Ticket Number:	31259786	Size of Load (C.Y.):	10	Weather Conditions:	Clear	
	Water Added at Job Site: <input type="checkbox"/> Yes <input checked="" type="checkbox"/> No If Yes: Gal. To C.Y.						Extra Water Authorized By:		
	Slump (inches) <sup>2</sup> :	6	Air Temperature (° F):	78	Concrete Temperature (° F) <sup>3</sup> :	75	Wet Weight (P.C.F.):		
	Air Content (% by Vol) <sup>4</sup> :	N/A	Molded and Cured <sup>5</sup> to general accordance with ASTM C-31: <input checked="" type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Unknown				Tested to ASTM C-39: <input checked="" type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No		
Location of Concrete Placement: Slab on Grade at East Side of Job Site H / S Area, 100' North of Southeast Corner									
Set No.	Date Received in Lab	Date Tested	Age (days)	Test Specimen Size		Total Load Applied (lbs)	Test Strength (psi)	Type of Fracture	Specimen Weight (Air Dry-lbs)
709				Diameter (in.)	Area (sq. in.)				
A	06/01/10	06/04/10	7	4.04	12.82	77,000	6,010	5	
B	06/01/10	06/04/10	7	4.05	12.88	80,500	6,250	5	
C	06/01/10	06/25/10	28	4.03	12.76	97,000	7,600	5	
D	06/01/10	06/25/10	28	4.05	12.88	96,000	7,450	5	
E	06/01/10	06/25/10	28	4.03	12.76	96,500	7,560	4	
F	06/01/10		H						
G	06/01/10		H						

**Fig. 2:** The test agency made seven 4 x 8 in. concrete cylinders. Two cylinders were tested at 7 days, three cylinders were tested at 28 days, and two hold cylinders remained available for testing at later age if needed

indicates that judgment should be applied as to the significance of low strength test results and whether they are a cause for concern. If further investigation is deemed necessary, such investigation may include in-place tests as described in ACI 228.1R-19<sup>9</sup> or, in extreme cases, the taking and testing of cores.

Engineering judgment is developed through experience. An engineer should evaluate low strength test results in view of the following observations:

- Any discrepancy or deficiency in testing provides a lower-bound value of the concrete delivered to the project. Thus, if a testing issue is suspected, the actual compressive strength is higher than the test value. Further, the most likely problem could be a lack of proper initial curing of test specimens at the jobsite;
- Concrete compressive strength increases with age. Thus, concrete strength tested at a later age is higher than the strength tested at an earlier age. The rate of strength gain is greater for mixtures containing supplementary cementitious materials such as fly ash or slag cement; and
- Compressive strength from a single cylinder tested at a later age can be used as the basis to determine if the concrete is structurally adequate. Thus, even though it is not a Code-recognized strength test, it can be used as the basis for acceptance. The engineer can consider that service and live loads on a structural member may be applied at an age later than 28 days.

### Assessing testing variations from ASTM standards

It is important that procedures are conducted in accordance with ASTM standards. Deficiencies in handling and testing cylinders will result in a lower measured strength.<sup>10</sup> All violations add up to cause significant reductions in measured strength. Richardson<sup>11</sup> states that “the simplicity of the strength test is misleading because the measured results are

very much dependent upon strictly adhering to standardized uniform procedures. Violation of these procedures can lead to inaccurate results. All too often, the results of strength measurements are fraught with testing errors. Most deviations from the standardized procedures for testing result in low strength results. The consequences of falsely low results can be: 1) unnecessary delays; 2) costly follow-up testing; 3) wasteful overdesign; and 4) possible rejection of concrete acceptable for the intent.<sup>12</sup>

Per ACI 214R-11(19), Section 3.3: “Deviations in field sampling, specimen preparation, curing, and testing procedures may cause lower strength test results.” The committee provides a list of principal sources of strength variation:

- Improper sampling from the batch;
- Variations due to fabrication techniques:
  - Substandard conditions,
  - Incorrect tools,
  - Poor quality, damaged, or distorted molds,
  - Nonstandard molding and consolidation, and
  - Incorrect handling of fresh test samples;
- Differences in curing:
  - Delays in beginning initial curing,
  - Temperature variation,
  - Variable moisture control,
  - Nonstandard initial curing,
  - Delays in bringing cylinders to the laboratory,
  - Rough handling of cylinders in transport, and
  - Improper final curing; and
- Variations in sample testing:
  - Uncertified tester,
  - Specimen surface preparation,
  - Inadequate or uncalibrated testing equipment,
  - Nonstandard loading rate, and
  - Poor recordkeeping.

Assessing testing variations can be time consuming and costly. However, a review of the strength test report can provide a preliminary assessment of the testing procedures:

- Check cylinder diameter and height. They should not all be exactly 6 x 12 in. or 4 x 8 in.;
- Check coefficient of variation between companion cylinders tested at the same age. On average, this should not exceed 3% and the difference in strength between companion cylinders should not exceed 8% more often than about 1 in 20;
- Check the 3- and 7-day strengths compared to the 28-day strength. They should have a consistent trend; and
- Other details may provide some information: truck sampled, load size, time between batching and sampling, ambient temperature and other conditions, and dates of cylinder casting and of transporting to the lab.

### Supplementary data from reserve or hold cylinders

It’s unclear when reserve or hold cylinders became a normal addition to project specifications for concrete testing,

but it seems to date back at least 50 years. Recent project specifications we have encountered (for a hotel, medical center, transit center, and water treatment facility) included the following provision:

“Compressive strength tests: ASTM C39/C39M-12, one set for each 100 cu. yd. or fraction thereof, of each class of concrete placed in any one day or for each 5,000 sq. ft. of surface area placed: one specimen tested at 7 days, two specimens tested at 28 days and one specimen retained in reserve at the laboratory for later testing if required.”

The project specification requires one extra specimen for each 100 yd<sup>3</sup> of concrete placed. For a project with 10,000 yd<sup>3</sup> of concrete, the owner pays for 100 additional reserve or hold cylinders. And on a large project with 100,000 yd<sup>3</sup> of concrete, the owner pays for an additional 1000 reserve or hold cylinders. The cost of making, curing, storing, and testing a cylinder varies from \$75 to \$150. The cost will be lower if the hold cylinders are not tested. For simplicity, consider the cost to be \$100, thus increasing the testing cost by as much as \$100,000. The design team and owner must believe that the increased cost is necessary and beneficial to the project. In other words, project specifications requiring reserve or hold cylinders anticipate possible issues and the need and use of additional strength data. Balance this cost with that for core tests and associated schedule delays.

The Portland Cement Association’s (PCA) *Design and Control of Concrete Mixtures* recognizes the use of “hold” cylinders: “In addition to the cylinders for acceptance testing, project specifications often require one or two 7-day cylinders and one or more ‘hold’ cylinders. The 7-day cylinders monitor early strength gain to signal potential problems in meeting specified strength. Hold cylinders are commonly used to provide additional information in case the cylinders tested for acceptance are damaged or do not meet the required compressive strength. For low 28-day test results, the hold cylinders are typically tested at 56 days.”<sup>13</sup> This statement was first included in 2003 in the 14th edition of this publication.<sup>14</sup>

In response to a question regarding the minimum number of reserve cylinders, the November 2011 Q&A in *Concrete International* stated: “It’s prudent to have at least one ‘hold’ cylinder as a backup for a poorly fabricated or damaged cylinder (it’s not acceptable to discard a cylinder break result simply because it was low—it must fall outside a range provided in the precision statement in ASTM C39, ‘Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens’).”<sup>15</sup> NRMCA CIP 35<sup>3</sup> also advocates for the use of additional reserve cylinders that can be tested if one cylinder of a set breaks at a lower strength.

First introduced into ACI 318-14<sup>16</sup> and continued in ACI 318-19, Commentary Section R26.12.1.1(a) states: “Casting and testing more than the minimum number of specimens may be desirable in case it becomes necessary to discard an outlying individual cylinder strength in accordance with ACI 214R. If individual cylinder strengths are discarded in accordance with ACI 214R, a strength test is valid provided

at least two individual 6 x 12 in. cylinder strengths, or at least three 4 x 8 in. cylinder strengths, are averaged. All individual cylinder strengths that are not discarded in accordance with ACI 214R are to be used to calculate the average strength.” Thus, the Code is endorsing the concept of using reserve or hold cylinders.

### One cylinder strength information

The Commentary in ACI 318-63 addressed the issue of a single cylinder as a test:

“An excessive discrepancy in strength between individual cylinders constituting a test indicates either a faulty specimen or improper sampling and testing procedures. If it can be established that one of the specimens was faulty, its strength should be discarded, and the other value used as the test result. In the absence of such evidence, it may be necessary to discard the entire test since its validity as a measure of concrete quality is questionable.”<sup>17</sup>

While the 1963 Commentary on the Code recommended that the single value be used as the test result, code commentaries following the 1963 edition indicate that one single cylinder is not a valid strength test.

PCI MNL-116-21 provides more definitive guidance on the use of one cylinder as a test: “Only one specimen may be used to determine stripping or stress transfer strength as production progresses. If any specimen shows definite evidence (other than low strength) of improper sampling, molding, handling, curing, or testing, it shall be discarded, and the strength of the remaining cylinder shall be considered the test result.”<sup>18</sup> Note that the purpose for this is to estimate in-place strength for production of prestressed members.

Historically, engineers on many different projects have used engineering judgment to accept concrete strength at a later age based on supplemental information from one cylinder. We encourage engineers to continue to use engineering judgment and supplemental strength information in determining if the concrete is acceptable.

### In-Place Concrete Strength from Core Testing

Too often, construction managers or general contractors initiate core testing without direction from the engineer when a compressive strength test is below  $f'_c$ . This is often an unnecessary expense and frequently leads to core removal and testing that is not in accordance with ASTM C42/C42M,

# How to Become ACI-CERTIFIED



If you're a craftsman, technician, or inspector, earning an ACI Certification provides you with the credentials to build the best concrete structures in the world. If you're a specifier or owner, you know many codes require ACI-certified personnel on the jobsite. Visit [concrete.org/certification](https://concrete.org/certification).



#### TESTING/TRAINING CENTERS

ACI has partnered with like-minded organizations across the globe to train candidates and administer written and performance exams



#### PROMETRIC TESTING CENTERS

ACI also has partnered with Prometric to allow candidates to take written exams at their convenience



#### CCRL TOURS

Performance exams for select programs can be taken during your CCRL lab evaluation

“Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete.”<sup>19</sup> ACI 318-19, Commentary Section R26.12.6.1(c), considers the engineer as the specifier of the tests. This is an important distinction, as ASTM C42/C42M recognizes that this individual is permitted to alter default requirements and is responsible for the analysis or review and acceptance of core test results.

In addition, Commentary Section R26.12.6.1 of ACI 318-19 provides three important considerations with respect to core testing:

- Measuring compressive strength of cores should only be used in extreme cases;
- Extraction of cores and their subsequent testing is typically at an age later than specified for  $f'_c$ ; and
- Core strengths need not be adjusted based on the age of the cores.

The same commentary section also states that the Code provides “conservative acceptance criteria” for cores for “virtually any type of construction.” And that “Lower strength may be tolerated under many circumstances, but this is a matter of judgment on the part of the licensed design professional and building official.” Per ACI 318-19, Section 26.12.6.1, Part (e): “Concrete in an area represented by core tests shall be considered structurally adequate if (1) and (2) are satisfied:

- (1) The average of three cores is equal to at least 85 percent of  $f'_c$ .
- (2) No single core is less than 75 percent of  $f'_c$ .”

When “extreme cases” arise and cores are necessary, use the American Society of Concrete Contractors (ASCC) “Technical Checklist: Concrete Core Testing”<sup>20</sup> to ensure that drilled cores are obtained and tested properly.

Before commissioning expensive and possibly disruptive core tests, the project team should consider in-place testing. As stated in ACI 318-19, Commentary Section R26.12.6.1: “In-place tests of concrete, such as probe penetration (ASTM C803<sup>[21]</sup>), rebound hammer (ASTM C805<sup>[22]</sup>), or pullout test (ASTM C900<sup>[23]</sup>), may be useful in determining whether a portion of the structure actually contains low-strength concrete. Unless these in-place tests have been correlated with compressive strength using accepted procedures, such as described in ACI 228.1R, they are of value primarily for comparisons within the same structure rather than as quantitative estimates of strength.”

## Claims, Credits, and Damages, Oh My!

The most often cited claim is: “The 28-day cylinder strength should be at or above specified strength or the owners are not getting what they paid for. There is nothing wrong with accepting the concrete if you are satisfied that it is adequate, but perhaps there should be a financial adjustment to the benefit of the owners as they clearly did not get what they paid for.”

Unfortunately, this argument assumes that  $f'_c$  is an absolute minimum. If this were true, then the Code strength

acceptance criterion (1) in Section 26.12.3.1(a) of “every average of any three consecutive strength tests equals or exceeds  $f'_c$ ” would have no meaning. If  $f'_c$  were a minimum, then, of course, the average of three consecutive strength tests would always exceed  $f'_c$ . Therefore, this Code criterion clearly acknowledges that some individual strength test results will be less than  $f'_c$ .

As for a financial adjustment, how would that be calculated? As stated in *Common Sense Construction Law*,<sup>24</sup> the requirement that financial adjustments be reasonably proportionate to actual damages stems from the fact that courts have traditionally refused to enforce what amounts to a penalty for breach of contract. One primary objection to penalties is that while the law favors reimbursement for loss, it does not approve of granting a windfall or unearned profits, even to an innocent party. To allow an injured party to recover an amount more than the actual damages it has suffered would in effect put that party in a better position that it would have had been in had the contract been performed. This result would be inconsistent with the basic theory of contract damages.

In closing, the owner is benefiting from a reduced concrete cost by allowing some test results to be below  $f'_c$ . Providing a financial credit for this issue would indeed be granting a windfall to the owner and would not be appropriate.

## References

1. ACI Committee 301, “Specifications for Concrete Construction (ACI 301-20),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 69 pp.
2. ACI Committee 214, “Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11) (Reapproved 2019),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 16 pp.
3. “CIP 35—Testing Compressive Strength of Concrete,” National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2014, 2 pp.
4. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 623 pp.
5. ACI Committee E702, “Designing Concrete Structures: Acceptance of Concrete Compressive Strength Test Results According to ACI 318-19 (ACI E702.3-21),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 5 pp.
6. Malisch, W.R., and Suprenant, B.A., “Acceptance of Concrete Test Results,” *Concrete Contractor*, Aug./Sept. 2015, pp. 6-8.
7. MasterSpec®, The American Institute of Architects, Washington, DC.
8. “In-Place Concrete Strength Evaluation—A Recommended Practice,” Publication 133, National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2011.
9. ACI Committee 228, “Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength (ACI 228.1R-19),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 48 pp.
10. “CIP 9—Low Concrete Cylinder Strength,” National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2014, 2 pp.
11. Richardson, D.N., “Review of Variables that Influence Measured Concrete Compressive Strength,” *Journal of Materials in Civil*

Engineering, V. 3, No. 2, May 1991.

12. Goeb, E.O., "Why Low Cylinder Tests in Hot Weather?" *Concrete Construction*, Jan. 1986, 3 pp.

13. Wilson, M.L., and Tennis, P.D., *Design and Control of Concrete Mixtures*, 17th edition, EB001, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2021, 586 pp.

14. Kosmatka, S.H.; Kerkhoff, B.; and Panarese, W.C., *Design and Control of Concrete Mixtures*, EB001, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2002, 358 pp.

15. "Concrete Q&A: Reserve Cylinders for Compressive Strength Testing," *Concrete International*, V. 33, No. 11, Nov. 2011, p. 72.

16. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 519 pp.

17. ACI Committee 318, "Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-63)," SP-10, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1963, 91 pp.

18. "Manual for Quality Control for Plants and Production of Structural Precast Concrete Products," MNL-116-21, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2021, 340 pp.

19. ASTM C42/C42M-20, "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 7 pp.

20. "Technical Checklist: Concrete Core Testing," American Society of Concrete Contractors, St. Louis, MO, June 2008, 4 pp.

21. ASTM C803/C803M-18, "Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 5 pp.

22. ASTM C805/C805M-18, "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 4 pp.

23. ASTM C900-19, "Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 10 pp.

24. *Smith, Currie & Hancock's Common Sense Construction Law: A Practical Guide for the Construction Professional*, fourth edition, T.J. Kelleher, Jr. and G.S. Walters, eds., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2009, 736 pp.

Selected for reader interest by the editors.



ACI member **James Klinger** is a Concrete Construction Specialist for the American Society of Concrete Contractors (ASCC), St. Louis, MO, USA. He is a member of Joint ACI-ASCC Committee 117, Tolerances; ACI Committees 134, Concrete Constructability, and 318, Structural Concrete Building Code; and ACI Subcommittee 318-A, General, Concrete, and Construction. Klinger

received his master's degree in structural engineering from the University of Maryland, College Park, MD, USA.



**Colin L. Lobo**, FACI, is Executive Vice President of the Engineering Division at the National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), Alexandria, VA, USA. He serves on several ACI committees, including 132, Responsibility in Concrete Construction; 211, Proportioning Concrete Mixtures; 214, Evaluation of Results of Tests Used to Determine the Strength of Concrete; 301, Specifications for Concrete Construction;

318, Structural Concrete Building Code; and 329, Performance Criteria for Ready Mixed Concrete. He received his BE in civil engineering from the University of Mysore, Mysore, Karnataka, India; his MS from Northeastern University, Boston, MA, USA; and his PhD from Purdue University, West Lafayette, IN, USA. He is a licensed engineer in the state of Maryland.



ACI member **Eamonn F. Connolly** is the Director of Engineering at James McHugh Construction Co., Chicago, IL, USA. He has over 20 years of extensive and wide-ranging experience as a structural engineer and manager in the design and construction of numerous high-rise buildings and infrastructure projects. He is the past Chair of ACI Committee

309, Consolidation of Concrete, and a member of Joint ACI-ASCC Committee 117, Tolerances, as well as ACI Committees 134, Concrete Constructability; 347, Formwork for Concrete; and 435, Deflection of Concrete Building Structures; and ACI Subcommittees 301-I, Post-Tensioned Concrete - Section 9, and 318-A, General, Concrete, and Construction. He received his BS in civil engineering from the Illinois Institute of Technology, Chicago, IL, USA, and his Master of Philosophy in Engineering from University of Aberdeen, Aberdeen, UK. He is a licensed structural engineer in Illinois and a licensed professional engineer in eight states.



**Bruce A. Suprenant**, FACI, is the ASCC Technical Director, St. Louis, MO. He is a member of ACI Committees 134, Concrete Constructability, and 302, Construction of Concrete Floors; and Joint ACI-ASCC Committees 117, Tolerances, and 310, Decorative Concrete. His honors include 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.

# En cada proyecto debemos esperar que los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión sean inferiores a la resistencia especificada

*Involucrar el juicio de un ingeniero, ensayar cilindros de reserva y extraer núcleos sólo si se pueden evaluar*

**por James Klinger, Colin L. Lobo, Eamonn F. Connolly y Bruce A. Suprenant**

¿Le sorprende el título? En cada proyecto, los profesionales experimentados de la industria del concreto reconocen que los resultados de las pruebas individuales de resistencia a la compresión pueden ser inferiores a la resistencia especificada,  $f'_c$ . Aunque hay numerosas razones por las que esto podría ocurrir, una razón importante es: los estándares para los criterios de aceptación utilizados en Estados Unidos se basan en conceptos estadísticos que permiten un resultado de prueba bajo, y es una práctica estándar para los productores de concreto diseñar mezclas de concreto basadas en una probabilidad de alrededor del 10% de que una prueba de resistencia individual pueda ser inferior al valor de  $f'_c$ .<sup>1-3</sup> Esto se hace de manera que el propietario se beneficie de una mezcla de concreto económica y sustentable que cumpla con el Código ACI 318-19<sup>4</sup> y represente un riesgo limitado para el desempeño estructural considerando en el diseño el uso de factores de seguridad y resistencia. Cuando el resultado de un ensayo de resistencia a compresión es sustancialmente inferior al valor de  $f'_c$ , para resolver el problema se recurre al juicio técnico, al uso de cilindros de reserva y, si es necesario, a la evaluación de los núcleos extraídos.

## ¿Es normal que una prueba de resistencia sea inferior al $f'_c$ y con qué frecuencia?

Un resultado individual de una prueba de resistencia a compresión menor que el

valor de  $f'_c$  es aceptable de acuerdo con el Código.<sup>3,5,6</sup> En la Sección 26.12.3.1 del ACI 318-19, los criterios de aceptación de la resistencia establecen que los resultados de la prueba de resistencia son aceptables si:

- El promedio de tres pruebas consecutivas es igual o superior al valor de  $f'_c$ ; y
- Cada ensayo individual supera el valor de  $(f'_c - 500 \text{ psi})(f'_c - 35 \text{ kg/cm}^2)$  o  $0.9 f'_c$ , si el valor de  $f'_c$  supera los 5000 psi. ( $350 \text{ kg/cm}^2$ )

El ACI 301-20, en su Sección 4.2.3.3,<sup>1</sup> establece el proceso para determinar la resistencia promedio requerida,  $f'_{cr}$ , con una probabilidad de cumplimiento del 99% (las pruebas de resistencia pueden fallar al criterio en un 1% de probabilidad).

Por lo que respecta al primer criterio de resultados aceptables del ensayo de resistencia, el valor de  $f'_{cr}$  debe ser al menos 1.34 $s_s$  mayor que el de  $f'_c$ , siendo  $s_s$  la desviación estándar de al menos 30 ensayos de resistencia de la misma clase de concreto de un proyecto anterior. En una distribución estadística normal, el factor 1.34 indica que aproximadamente el 10% de las pruebas de resistencia individuales pueden ser inferiores a  $f'_c$ .

El ACI 318-19, Sección 26.12.2.1, y el ACI 301-20, Sección 1.7.3.3(d), establecen la misma frecuencia mínima de pruebas de resistencia a la compresión a razón de una prueba por cada 150 yd<sup>3</sup> ( $114.68 \text{ m}^3$ ) de concreto. Se suele hacer referencia al



ACI 301 en las Especificaciones del Proyecto y en el AIA MasterSpec® Sección 033000- Concreto Colado en el Lugar.<sup>7</sup> Algunas especificaciones de proyectos exigen ensayos con una frecuencia mayor, normalmente un ensayo por cada 100 yd<sup>3</sup> (76.46 m<sup>3</sup>) de concreto. La Tabla 1 muestra con qué frecuencia es probable que el ensayo de resistencia a compresión medido esté por debajo del  $f'_c$ , basándose en los conceptos estadísticos de la frecuencia de los ensayos a razón de un ensayo por cada 100 o 150 yd<sup>3</sup> (76.46 o 114.68 m<sup>3</sup>) de concreto.

Para un proyecto con 10,000 yd<sup>3</sup> (7,645.55 m<sup>3</sup>) de concreto, es de esperar entre siete y 10 pruebas con resultados menores al valor de  $f'_c$ . En un proyecto grande con 100,000 yd<sup>3</sup> (76,455.49 m<sup>3</sup>) de concreto, este número es de 67 a 100. Si esto no se cumple, la mezcla de concreto se sobredimensiona más de lo requerido por el ACI 301. Esto puede estar relacionado con los requerimientos de las normas donde una relación máxima agua/materiales cementantes ( $a/cm$ ) no es consistente con el valor de  $f'_c$  o se especifica un contenido mínimo de cemento. Algunos productores también aumentan la resistencia

**Tabla 1:**  
**Número esperado de resultados de pruebas de resistencia a la compresión inferiores al valor de  $f'_c$**

Volumen de concreto colocado, yd <sup>3</sup>	Número mínimo de pruebas		Número esperado de pruebas inferiores al valor de $f'_c$	
	Una por cada 150 yd <sup>3</sup> (ACI 318-19, ACI 301-20)	Una por cada 100 y <sup>3</sup>	Una por cada 150 yd <sup>3</sup> (ACI 318-19, ACI 301-20)	Una por cada 100 y <sup>3</sup>
1000	7	10	1	1
10,000	70	100	7	10
50,000	334	500	34	50
100,000	667	1000	67	100

de las mezclas para evitar problemas relacionados con las pruebas.

Cuando los resultados de las pruebas de resistencia son inferiores al  $f'_c$ , es posible que la falla esté en las pruebas y no sea representativa del concreto entregado. Esto es especialmente cierto cuando la fabricación, la manipulación, el curado y los ensayos de los cilindros no se realizan de acuerdo con las normas ASTM aplicables. Por lo tanto, los problemas relacionados con las pruebas pueden complicar el establecer cuántos resultados de estas serán inferiores al valor de  $f'_c$  y, lo que es más importante, si los resultados de las pruebas de resistencia son representativos del concreto suministrado.

Cuando las pruebas de resistencia no cumplen los criterios de aceptación del ACI 318, deben tomarse medidas para aumentar las siguientes pruebas de resistencia. En la Sección de Comentarios de R26.12.3.1(b) del ACI 318-19, se ofrece orientación sobre los pasos a seguir para aumentar las pruebas de resistencia en el futuro. La Asociación Nacional de Concreto Premezclado (NRMCA, por sus siglas en inglés) sugiere una secuencia de evaluación más relevante.<sup>8</sup> Si una prueba de resistencia individual no cumple con el segundo criterio del ACI 318-19 para los resultados de pruebas de resistencia aceptables, entonces el Código solicita una investigación de baja resistencia.

Los laboratorios de pruebas no reconocen que una prueba de resistencia a la compresión puede ser inferior a  $f'_c$  y seguir cumpliendo los criterios de aceptación del Código. Lamentablemente, el laboratorio de pruebas marca el informe de pruebas como “fallido” o “rechazado”, ambas calificaciones son inapropiadas. En primer lugar, la prueba no incumplió los criterios de aceptación del Código y, en segundo lugar, el laboratorio de pruebas no tiene autoridad para aceptar o rechazar. Esta información

engañoso suele crear confusión, gastos y retrasos innecesarios. Esta cuestión debería discutirse en la reunión previa a la construcción. Algunos laboratorios de pruebas creen que deben alertar al propietario o al equipo de diseño si la resistencia medida en un solo cilindro a los 7 días no alcanza un determinado porcentaje que se supone para la resistencia especificada a los 28 días. Esta práctica podría causar un pánico innecesario y debería evitarse porque normalmente no hay ningún requisito a los 7 días, ensayar un cilindro no es una prueba válida, y cada mezcla tiene una tasa única de ganancia de resistencia.

### Cuesta menos estar por debajo del $f'_c$ – Beneficios para el propietario

¿Cuál es el gasto si ninguna prueba de resistencia puede ser inferior al valor de  $f'_c$ ? Si  $f'_c$  es la resistencia mínima absoluta, la mezcla debe ser diseñada para un nivel de resistencia al menos tres desviaciones estándar mayor que  $f'_c$ . Esto requerirá al menos 50 libras más de cemento en cada yarda cúbica de concreto. Esto podría aumentar el precio del concreto hasta unos \$15 dólares por yarda cúbica. Para un proyecto con 10,000 yd<sup>3</sup> de concreto, el costo adicional del concreto sería de \$15,000 dólares. Y en un proyecto de gran tamaño con 100,000 yd<sup>3</sup> de concreto, el costo adicional del concreto sería de \$1'500,000 dólares. Ese es el beneficio que recibe el propietario al permitir algunas pruebas de resistencia por debajo del  $f'_c$ . Con un mayor contenido de cemento, se pueden generar problemas adicionales como el incremento del potencial de agrietamiento por mayor contracción o efectos térmicos. En esta era de la construcción ecológica, al aumentar la resistencia del concreto también se incrementa su huella de carbono y se dificulta la consecución de los objetivos de sustentabilidad de los proyectos.

### Utilizar conscientemente los cilindros de prueba – Discutirlo en la reunión previa a la construcción

Durante la reunión previa a la construcción, el ingeniero debe dar instrucciones al laboratorio encargado de las pruebas sobre las medidas

adecuadas cuando los resultados de las pruebas de resistencia sean inferiores al  $f'_c$ . Generalmente, se elabora un juego de cuatro a seis cilindros a partir de una muestra de concreto (Figura. 1). Preferentemente, retener cilindros adicionales para ensayar a una edad posterior si es necesario (Figura. 2).

Los detalles de los cilindros de reserva o adicionales se analizan en una sección posterior. No obstante, cabe señalar que estos cilindros deben utilizarse antes de los ensayos de núcleos porque el equipo de diseño consideró prudente exigir cilindros de reserva o adicionales en las especificaciones del proyecto y el propietario consideró que era benéfico pagarlos. La decisión de sacar núcleos añade un costo extra sin obtener el beneficio de la información adicional de los cilindros de reserva que ya están pagados.

Se debe discutir un elemento de prueba adicional, según las recomendaciones del NRMCA CIP 35: “Si uno o ambos cilindros de una muestra se rompen con una resistencia inferior al  $f'_c$ , hay que evaluar los cilindros en busca de problemas obvios y retener los cilindros probados para su examen posterior”.<sup>3</sup> Esto es generalmente una práctica común en un laboratorio de pruebas; sin embargo, debe ser discutido para asegurarse de que los cilindros están disponibles para ser examinados.



Figura. 1: Normalmente, se fabrican de cuatro a seis cilindros de concreto de 6 x 12 pulg. en la obra para cumplir con los requisitos de las especificaciones del proyecto (foto cortesía de PCA)

DATOS DE CAMPO Y DE LABORATORIO	Fecha:	5/28/2010	Hora de dosificación del concreto:	8:10 A.M.	Hora de muestreo del concreto:	8:35 A.M.	Muestreado por:	KT	
	Camión de concreto núm.:	24453	Recibo núm.	31259786	Tamaño de la Carga (yd <sup>3</sup> )	10	Condiciones Ambientales:	Despejado	
	Agua Añadida en Sitio:	<input type="checkbox"/> Yes <input checked="" type="checkbox"/> No		Si sí:	Galones totales	yd <sup>3</sup>	Agua Extra Autorizada por:	N/A	
	Revenimiento (pulgadas) <sup>2</sup> :	6	Temperatura del Aire (°F)	78	Temperatura del Concreto (°F) <sup>3</sup> :	75	Peso Húmedo (lbs/pie <sup>3</sup> )	N/A	
	Contenido de Aire (% por Vol) <sup>4</sup>	N/A	Moldeado y Curado <sup>5</sup> de conformidad con ASTM C-31:			Ensayado con ASTM C-39		<input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No	
			<input type="checkbox"/> Yes <input checked="" type="checkbox"/> No		<input type="checkbox"/> Desconocido				
Lugar del Colado Losa sobre rasante en el lado este de la zona H/S de la obra, 100° al norte de la esquina sureste									
Juego No.	Fecha de recibido en el Laboratorio	Fecha de ensayo	Edad (años)	Tamaño del espécimen de prueba		Carga total aplicada (lbs)	Resistencia de ensayo (psi)	Tipo de fractura	Peso del espécimen (Secado al aire)
709				Diámetro (pulg.)	Área (pulg. <sup>2</sup> )				
A	06/01/10	06/04/10	7	4.04	12.82	77,000	6,010	5	
B	06/01/10	06/04/10	7	4.05	12.88	80,500	6,250	5	
C	06/01/10	06/25/10	28	4.03	12.76	97,000	7,600	5	
D	06/01/10	06/05/10	28	4.05	12.88	96,000	7,450	5	
E	06/01/10	06/25/10	28	4.03	12.76	96,500	7,560	4	
F	06/01/10		H						
G	06/01/10		H						

Figura. 2: El laboratorio encargado de las pruebas fabricó siete cilindros de concreto de 4 x 8 pulg. Dos cilindros se ensayaron a los 7 días, tres cilindros se ensayaron a los 28 días, y dos cilindros adicionales se retuvieron para ensayarlos a una edad posterior si fuera necesario

A menudo, la simple medición del peso de un cilindro para calcular una densidad aproximada antes de la prueba puede ser útil para determinar si hubo una compactación inadecuada, objetos extraños incrustados u otros problemas.

A veces los ingenieros son reacios o se niegan a considerar la información que aportan los cilindros de reserva o adicionales. Si ese es el caso, se debe mantener una conversación con el propietario antes de la construcción. El propietario sólo quiere pagar para recibir un beneficio y, si los cilindros de reserva o adicionales no lo hacen, deben ser eliminados del contrato de pruebas.

## Investigando los resultados de las pruebas con baja resistencia

El ACI 318 y el ACI 301 establecen los requisitos cuando una prueba de baja resistencia debe ser investigada. Se debe involucrar el juicio de un ingeniero para determinar el alcance de la investigación a fin de verificar si es necesaria una acción correctiva. En primer lugar, hay que preguntarse: si el resultado de la prueba es cierto, ¿tiene importancia?

La sección 26.12.6.1, parte (b), del ACI 318-19 requiere que el ingeniero considere si “los cálculos indican que la capacidad estructural se ha reducido significativamente”. Si el resultado bajo de la prueba es adecuado, ¿por qué gastar tiempo y dinero en determinar la causa principal? No obstante, según los principios estadísticos aceptados, debe considerarse la posibilidad de realizar un análisis de la causa raíz cuando haya un número de resultados de baja resistencia superior al previsto.

El ingeniero dispone de herramientas para investigar el resultado de una prueba de resistencia baja, entre ellas: 1) utilizando el juicio de un ingeniero experimentado; 2) evaluando las variaciones de las pruebas con respecto a las normas; 3) datos complementarios de las pruebas de cilindros de reserva o adicionales; 4) pruebas no destructivas para una evaluación relativa; y 5) pruebas de núcleos utilizando los criterios de resistencia de núcleos indicados en ACI 318.

### Juicio de los ingenieros

El ACI 318-19 utiliza la palabra “juicio” 16 veces en el documento. La primera cita que aparece en la Introducción podría ser la más importante: “El Código y el Comentario no pueden sustituir a los sólidos

conocimientos del ingeniero, la experiencia y el juicio”. La Sección de Comentarios R26.12.6.1 en el ACI 318-19 indica que se debe aplicar el juicio en cuanto a la importancia de los resultados de las pruebas de baja resistencia y si son una causa de preocupación. En caso de que se considere conveniente realizar una investigación adicional, ésta puede incluir ensayos en el lugar como se describe en el ACI 228.1R-19<sup>9</sup> o, en casos extremos, la extensión y ensayo de núcleos.

El juicio de los ingenieros se desarrolla a través de la experiencia. Un ingeniero debe evaluar los resultados de las pruebas de baja resistencia teniendo en cuenta las siguientes observaciones:

- Cualquier discrepancia o deficiencia en los ensayos proporciona un valor inferior del concreto entregado en el proyecto. Por lo tanto, si se sospecha que hay un problema en la prueba, la resistencia a la compresión real es mayor que el valor de la prueba. Además, el problema más probable podría ser la falta de un curado inicial adecuado de las muestras de ensayo en la obra;
- La resistencia a la compresión del concreto aumenta con la edad. Por lo tanto, la resistencia del concreto ensayado a una edad más avanzada es mayor que la resistencia ensayada a una edad más temprana. La tasa de aumento de la resistencia es mayor para las mezclas que contienen materiales cementantes suplementarios, como las cenizas volantes o el cemento de escoria; y
- La resistencia a la compresión de un solo cilindro ensayado a una edad posterior puede servir de base para determinar si el concreto es estructuralmente adecuado. Así pues, aunque no sea una prueba de resistencia reconocida por el Código, puede utilizarse como base para la aceptación. El ingeniero puede considerar que las cargas de servicio y vivas sobre un elemento estructural pueden aplicarse a una edad posterior a los 28 días.

### **Evaluación de las variaciones en los ensayos con respecto a las normas ASTM**

Es importante que los procedimientos se realicen de acuerdo con los estándares de la ASTM. Las deficiencias en la manipulación y el

ensayo de los cilindros darán lugar a una menor resistencia medida.<sup>10</sup> Todas las violaciones se suman para causar reducciones significativas en la resistencia medida. Richardson<sup>11</sup> afirma que “la simplicidad de la prueba de resistencia es engañosa porque los resultados medidos dependen en gran medida del estricto cumplimiento de los procedimientos uniformes estandarizados. El incumplimiento de estos procedimientos puede dar lugar a resultados imprecisos. Con demasiada frecuencia, los resultados de las mediciones de resistencia están plagados de errores en los ensayos. La mayoría de las desviaciones de los procedimientos estandarizados para los ensayos dan lugar a resultados de resistencia bajos. Las consecuencias de unos resultados falsamente bajos pueden ser: 1) retrasos innecesarios; 2) ensayos de seguimiento costosos; 3) sobrediseño innecesario; y 4) posible rechazo de un concreto aceptable para el propósito.<sup>12</sup>”

Según la Sección 3.3 del ACI 214R-11(19): “Las desviaciones en el muestreo de campo, la preparación de la muestra, el curado y los procedimientos de ensayo pueden causar resultados de ensayos de resistencia inferiores”. El comité proporciona una lista de las principales fuentes de variación de la resistencia:

- Muestreo inadecuado del lote;
- Variaciones debidas a las técnicas de fabricación:
  - o Condiciones inferiores a las indicadas en la norma,
  - o Herramientas incorrectas,
  - o Moldes de pobre calidad, dañados o defectuosos,
  - o Moldeo y compactación no estándar, y
  - o Manipulación incorrecta de las muestras para ensayo en estado fresco;
- Diferencias en el curado:
  - o Retrasos en el inicio del curado inicial,
  - o Variación de la temperatura,
  - o Control variable de la humedad,
  - o Curado inicial no estándar,
  - o Retrasos en el transporte de los cilindros al laboratorio,
  - o Manipulación brusca de los cilindros durante el transporte, y
  - o Curado final inadecuado; y
- Variaciones en los ensayos de las muestras:
  - o Técnico no certificado,
  - o Preparación de la superficie de la muestra,
  - o Equipo de ensayo inadecuado o no calibrado,

- o Velocidad de carga no estándar, y
- o Mala conservación de los registros.

La evaluación de las variaciones de las pruebas puede llevar mucho tiempo y ser costosa. Sin embargo, una revisión del informe de las pruebas de resistencia puede proporcionar una evaluación preliminar de los procedimientos de ensayo:

- Comprobar el diámetro y la altura de los cilindros. No todos deben tener exactamente 6 x 12 pulg. o 4 x 8 pulg;
- Comprobar el coeficiente de variación entre los cilindros compañeros ensayados a la misma edad. En promedio, no debe exceder el 3% y la diferencia en la resistencia de cilindros compañeros no debe exceder el 8% más que alrededor de 1 en 20;
- Comprobar las resistencias a los 3 y 7 días en comparación con la resistencia a los 28 días. Deben tener una tendencia consistente; y
- Otros detalles pueden proporcionar alguna información: camión muestreado, tamaño de la carga, tiempo entre la elaboración del lote y el muestreo, temperatura ambiente y otras condiciones, y las fechas de fabricación de los cilindros y de su transporte al laboratorio.

### Información complementaria de los cilindros de reserva o adicionales

No está claro cuándo los cilindros de reserva o adicionales se convirtieron en una adición normal a las especificaciones de los proyectos para las pruebas de concreto, pero parece que se remonta al menos a 50 años atrás. En las especificaciones de proyectos recientes que hemos encontrado (para un hotel, un centro médico, un centro de tránsito y una instalación de tratamiento de aguas) se incluía la siguiente disposición:

“Pruebas de resistencia a la compresión: ASTM C39/C39M-12, un juego por cada 100 yardas cúbicas (76.46 m<sup>3</sup>) o fracción, de cada tipo de concreto colocado en cualquier día o por cada 5,000 pies cuadrados (464.51 m<sup>2</sup>) de superficie colocada: un espécimen ensayado a los 7 días, dos especímenes ensayados a los 28 días y un espécimen retenido en reserva en el laboratorio para ensayos posteriores en caso de ser necesario.”

La especificación del proyecto exige una muestra adicional por cada 100 yd<sup>3</sup> de concreto colocado. En un proyecto con 10,000 yd<sup>3</sup> (283.17 m<sup>3</sup>) de

concreto, el propietario paga 100 cilindros adicionales de reserva o retención. Y en un proyecto grande con 100,000 yd<sup>3</sup> (2831.69 m<sup>3</sup>) de concreto, el propietario paga por 1000 cilindros adicionales de reserva o retención. El costo de fabricar, curar, almacenar y probar un cilindro varía de 75 a 150 dólares. El costo será menor si no se ensayan los cilindros de retención. Para simplificar, consideremos que el costo es de 100 dólares, con lo que el costo de las pruebas puede llegar a ser de 100,000 dólares. El equipo de diseño y el propietario deben creer que el aumento en el costo es necesario y en beneficio del proyecto. En otras palabras, las especificaciones del proyecto que requieren cilindros de reserva o adicionales anticipan posibles problemas, así como la necesidad y el uso de datos de resistencia adicionales. Se debe equilibrar este costo con el de las pruebas de núcleos y los retrasos asociados en el programa.

El documento Diseño y Control de Mezclas de Concreto de la Asociación de Cemento Portland (PCA) reconoce el uso de cilindros “adicionales”: “Además de los cilindros para las pruebas de aceptación, las especificaciones del proyecto a menudo requieren uno o dos cilindros de 7 días y uno o más cilindros de ‘retención’. Con los cilindros de 7 días se controla la ganancia de resistencia temprana para señalar posibles problemas en el cumplimiento de la resistencia especificada. Los cilindros de retención se utilizan habitualmente para proporcionar información adicional en caso de que los cilindros ensayados para su aceptación estén dañados o no cumplan la resistencia a la compresión requerida. Para resultados bajos a la edad de 28 días, los cilindros de retención suelen probarse a los 56 días”.<sup>13</sup> Esta declaración se incluyó por primera vez en el año 2003 en la 14<sup>a</sup> edición de esta publicación.<sup>14</sup>

En respuesta a una interrogante sobre el número mínimo de cilindros de reserva, en la sección de Q&R del Concrete International de noviembre de 2011 se señalaba que: “Es prudente tener al menos un cilindro ‘de reserva’ como respaldo para un cilindro mal fabricado o dañado (no es aceptable descartar el resultado del ensayo de un cilindro simplemente porque

fue bajo-debe quedar fuera de un rango provisto en la declaración de precisión en ASTM C39, 'Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto'.<sup>15</sup> El NRMCA CIP 35<sup>3</sup> también aboga por el uso de cilindros de reserva adicionales que puedan probarse si un cilindro de un juego falla con una resistencia inferior.

Introducido por primera vez en el ACI 318-14<sup>16</sup> y mantenido en el ACI 318-19, la Sección de Comentarios R26.12.1.1(a) establece: "La fabricación y el ensayo de un número de especímenes superior al mínimo puede ser deseable en caso de que sea necesario descartar la resistencia de un cilindro individual fuera del rango, de acuerdo con el ACI 214R. Si se descartan las resistencias individuales de los cilindros de acuerdo con el ACI 214R, una prueba de resistencia es válida siempre que se promedien al menos dos resistencias individuales de cilindros de 6 x 12 pulg, o al menos tres resistencias de cilindros de 4 x 8 pulg. Todas las resistencias individuales de los cilindros que no se descarten de acuerdo con el ACI 214R se utilizarán para calcular la resistencia media". Así pues, el Código respalda el concepto de utilizar cilindros de reserva o de retención.

### Información de resistencia de un cilindro

El Comentario en el ACI 318-63 abordó la cuestión de un solo cilindro como prueba:

"Una excesiva discrepancia en la resistencia entre los cilindros individuales que constituyen un ensayo indica o bien un espécimen defectuoso o procedimientos de muestreo y ensayo inadecuados. Si se puede establecer que uno de los especímenes era defectuoso, su resistencia debe descartarse y el otro valor debe utilizarse como el resultado del ensayo. En ausencia de tales evidencias, puede ser necesario descartar todo el ensayo, ya que su validez como medida de la calidad del concreto es cuestionable"<sup>17</sup>

Mientras que en el Comentario del Código de 1963 se recomendaba utilizar el valor único como resultado del ensayo, los comentarios del código posteriores a la edición de 1963 indican que un solo cilindro no es una prueba de resistencia válida.

El PCI MNL-116-21 proporciona una orientación más precisa sobre el uso de un cilindro como prueba: "Sólo puede utilizarse un espécimen para determinar la resistencia al desprendimiento o a la transferencia de esfuerzos a medida que avanza la producción. Si algún espécimen muestra evidencia definitiva (a excepción de una baja resistencia) de un muestreo, moldeado, manejo, curado o ensayo inadecuado, será descartado, y la resistencia del cilindro restante será considerada como el resultado del ensayo".<sup>18</sup> Nótese que el propósito de esto es estimar la resistencia en el lugar para la producción de elementos pretensados.

Históricamente, los ingenieros de muchos y diversos proyectos han utilizado su juicio de ingeniería para aceptar la resistencia del concreto a una edad más avanzada, basándose en la información complementaria de un cilindro. Animamos a los ingenieros a que sigan utilizando su criterio de ingeniería y la información complementaria sobre la resistencia para determinar si el concreto es aceptable.

### Resistencia del concreto en sitio a partir de pruebas de núcleo

Con demasiada frecuencia, los gerentes de construcción o los contratistas generales inician las pruebas de núcleos sin la dirección del ingeniero cuando una prueba de resistencia a la compresión está por debajo del valor de  $f'_c$ . Esto es a menudo un gasto innecesario y con frecuencia lleva a la extensión de núcleos y a la realización de pruebas que no se ajustan a la norma ASTM C42/C42M, "Método de prueba estándar para la obtención y el ensayo de núcleos perforados y vigas aserradas de concreto".<sup>19</sup> La Sección de Comentarios R26.12.6.1(c) del ACI 318-19 considera al ingeniero como el especificador de los ensayos. Se trata de una distinción importante, ya que la norma ASTM C42/C42M reconoce que esta persona puede alterar los requisitos establecidos y es responsable del análisis o de la revisión y aceptación de los resultados de los ensayos de núcleos.

Además, la Sección de Comentarios R26.12.6.1 del ACI 318-19 proporciona tres consideraciones importantes con respecto a las pruebas de núcleos:

- La medición de la resistencia a la compresión de los núcleos sólo debe utilizarse en casos extremos;
- La extensión de núcleos y su posterior ensayo se realiza normalmente a una edad posterior a la especificada para el  $f'_c$ ; y
- Las resistencias de los núcleos no necesitan ser ajustadas en base a la edad de estos.

La misma Sección de Comentarios también afirma que el Código proporciona “criterios de aceptación conservadores” para los núcleos de “prácticamente cualquier tipo de construcción.” Y que “se puede tolerar una resistencia menor en muchas circunstancias, pero esto es una cuestión de juicio por parte del profesional de diseño autorizado y del responsable de la construcción”. Según el ACI 318-19, sección 26.12.6.1, parte (e): “El concreto en un área representada por las pruebas de núcleos se considerará estructuralmente adecuado si se cumplen (1) y (2):

- (1) La media de tres núcleos es igual al menos al 85 por ciento del  $f'_c$ .
- (2) Ningún núcleo es inferior al 75 por ciento del  $f'_c$ .”

Cuando surjan “casos extremos” y sea necesario se deberán obtener núcleos adicionales, utilice la “Lista de comprobación técnica: Ensayos de núcleos de concreto”<sup>20</sup> de la Sociedad Americana de Contratistas de Concreto (ASCC por sus siglas en inglés) para garantizar que los núcleos extraídos se obtienen y se ensayan correctamente.

Antes de poner en marcha las costosas y posiblemente problemáticas pruebas de núcleos, el equipo del proyecto debería considerar la posibilidad de realizar pruebas en el lugar. Como se indica en la Sección de Comentarios R26.12.6.1 del ACI 318-19: “Los ensayos del concreto en el sitio, como la penetración de la sonda (ASTM C803<sup>21</sup>), el martillo de rebote (ASTM C805<sup>22</sup>) o el ensayo de extensión (ASTM C900<sup>[23]</sup>), pueden ser útiles para determinar si una parte de la estructura contiene realmente

concreto de baja resistencia. A menos que estas pruebas en el lugar se hayan correlacionado con la resistencia a la compresión utilizando procedimientos aceptados, como los descritos en el ACI 228.1R, resultan útiles principalmente para las comparaciones dentro de la misma estructura y no como estimaciones cuantitativas de la resistencia.”

## Reclamaciones, créditos y daños, ¡Cielos!

La reclamación más citada es: “La resistencia de los cilindros a los 28 días debería ser igual o superior a la especificada o los propietarios no están recibiendo por lo que han pagado. No hay nada de malo en aceptar el concreto si se está convencido de que es adecuado, pero tal vez debería haber un ajuste financiero en beneficio de los propietarios, ya que claramente no obtuvieron lo que pagaron.” Lamentablemente, este argumento asume que  $f'_c$  es un mínimo absoluto. Si esto fuera cierto, entonces el criterio de aceptación de la resistencia del Código (1) en la sección 26.12.3.1(a) de “cada promedio de tres pruebas de resistencia consecutivas iguales o superiores a  $f'_c$ ” no tendría sentido. Si  $f'_c$  fuera un mínimo, entonces, por supuesto, la media de tres pruebas de resistencia consecutivas siempre superaría  $f'_c$ . Por lo tanto, este criterio del Código reconoce claramente que algunos resultados de pruebas de resistencia individuales serán inferiores a  $f'_c$ .

En cuanto al ajuste financiero, ¿cómo se calcularía? Como se indica en La ley de la construcción con sentido común<sup>24</sup>, el requisito de que los ajustes financieros sean razonablemente proporcionales a los daños reales se deriva del hecho de que los tribunales se han negado tradicionalmente a aplicar lo que equivale a una sanción por incumplimiento de contrato. Una de las principales objeciones a las sanciones es que, si bien la ley favorece el reembolso por pérdidas, no aprueba la concesión de una indemnización o de beneficios inmerecidos, incluso para una de las partes inocentes. Permitir que una parte perjudicada recupere una cantidad superior a los daños reales que ha sufrido pondría, de hecho, a esa parte en una mejor situación que la que habría tenido si el contrato se hubiera cumplido.

Este resultado sería incompatible con la teoría básica de los daños contractuales.

Para terminar, el propietario se está beneficiando de una reducción del costo del concreto al permitir que algunos resultados de las pruebas estén por debajo de la  $f'_c$ . La concesión de un crédito financiero por esta cuestión sería, en efecto, la concesión de una ganancia inesperada para el propietario y no sería apropiada.

## Referencias

1. ACI Committee 301, "Specifications for Concrete Construction (ACI 301-20)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 69 pp.
2. ACI Committee 214, "Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11) (Reapproved 2019)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 16 pp.
3. "CIP 35—Testing Compressive Strength of Concrete," National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2014, 2 pp.
4. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 623 pp.
5. ACI Committee E702, "Designing Concrete Structures: Acceptance of Concrete Compressive Strength Test Results According to ACI 318-19 (ACI E702.3-21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 5 pp.
6. Malisch, W.R., and Suprenant, B.A., "Acceptance of Concrete Test Results," *Concrete Contractor*, Aug./Sept. 2015, pp. 6-8.
7. MasterSpec®, The American Institute of Architects, Washington, DC.
8. "In-Place Concrete Strength Evaluation—A Recommended Practice," Publication 133, National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2011.
9. ACI Committee 228, "Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength (ACI 228.1R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 48 pp.
10. "CIP 9—Low Concrete Cylinder Strength," National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2014, 2 pp.
11. Richardson, D.N., "Review of Variables that Influence Measured Concrete Compressive Strength," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 3, No. 2, May 1991.
12. Goeb, E.O., "Why Low Cylinder Tests in Hot Weather?" *Concrete Construction*, Jan. 1986, 3 pp.
13. Wilson, M.L., and Tennis, P.D., *Design and Control of Concrete Mixtures*, 17th edition, EB001, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2021, 586 pp.
14. Kosmatka, S.H.; Kerkhoff, B.; and Panarese, W.C., *Design and Control of Concrete Mixtures*, EB001, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2002, 358 pp.
15. "Concrete Q&A: Reserve Cylinders for Compressive Strength Testing," *Concrete International*, V. 33, No. 11, Nov. 2011, p. 72.
16. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 519 pp.
17. ACI Committee 318, "Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-63)," SP-10, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1963, 91 pp.
18. "Manual for Quality Control for Plants and Production of Structural Precast Concrete Products," MNL-116-21, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2021, 340 pp.
19. ASTM C42/C42M-20, "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 7 pp.
20. "Technical Checklist: Concrete Core Testing," American Society of Concrete Contractors, St. Louis, MO, June 2008, 4 pp.
21. ASTM C803/C803M-18, "Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 5 pp.
22. ASTM C805/C805M-18, "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 4 pp.
23. ASTM C900-19, "Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 10 pp.
24. Smith, Currie & Hancock's *Common Sense Construction Law: A Practical Guide for the Construction Professional*, fourth edition, T.J. Kelleher, Jr. and G.S. Walters, eds., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2009, 736 pp.





**James Klinger**, miembro de ACI, es especialista en construcción con concreto de la American Society of Concrete Contractors (ASCC), St. Louis, MO, USA. Es miembro del Comité Conjunto ACI-ASCC 117, Tolerancias; de los Comités ACI 134, Constructibilidad del Concreto, y 318, Código de Construcción del Concreto Estructural; y del Subcomité ACI 318-A, General, Concreto y Construcción. Klinger obtuvo un máster en ingeniería estructural en la Universidad de Maryland, College Park, MD, USA.



**Eamonn F. Connolly**, miembro de ACI, es el Director de Ingeniería de James McHugh Construction Co., Chicago, IL, USA. Cuenta con más de 20 años de amplia experiencia como ingeniero estructural y responsable del diseño y la construcción de numerosos edificios de gran altura y proyectos de infraestructuras. Fue presidente del Comité ACI 309, Consolidación del Concreto, y miembro del Comité Conjunto ACI-ASCC 117, Tolerancias, así como de los Comités ACI 134, Constructibilidad del Concreto; 347, Encofrado del Concreto; y 435, Deflexión de Estructuras de Concreto para Edificios; y de los Subcomités ACI 301-I, Concreto Postensado - Sección 9, y 318-A, General, Concreto y Construcción. Obtuvo su licenciatura en ingeniería civil por el Instituto Tecnológico de Illinois, Chicago, IL, USA, y su máster en ingeniería por la Universidad de Aberdeen, Aberdeen, UK. Es ingeniero estructuralista autorizado en Illinois y profesionalista autorizado en ocho estados.



**Colin L. Lobo**, FACI, es Vicepresidente Ejecutivo de la División de Ingeniería de la National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), Alexandria, VA, USA. Es miembro de varios comités del ACI, entre ellos el 132, Responsabilidad en la Construcción con Concreto; el 211, Proporcionamiento de Mezclas de Concreto; el 214, Evaluación de los Resultados de Ensayos Utilizados para Determinar la Resistencia del Concreto; el 301, Especificaciones para la Construcción con Concreto; el 318, Código de Construcción con Concreto Estructural; y el 329, Criterios de Desempeño para el Concreto Premezclado. Obtuvo su licenciatura en ingeniería civil por la Universidad de Mysore, Mysore, Karnataka, India; su máster por la Universidad de Northeastern, Boston, MA, USA; y su doctorado por la Universidad de Purdue, West Lafayette, IN, USA. Es ingeniero autorizado en el estado de Maryland.



**Bruce A. Suprenant**, FACI, es Director Técnico de la ASCC, San Luis, MO. Es miembro de los Comités ACI 134, Constructibilidad del Concreto, y 302, Construcción de Pisos de Concreto; y de los Comités Conjuntos ACI-ASCC 117, Tolerancias, y 310, Concreto Decorativo. Sus distinciones incluyen la Medalla ACI Arthur R. Anderson en 2021, el Premio ACI a la Construcción en 2020, el Premio ACI a la Certificación en 2013, el Premio ACI Roger H. Corbetta al Constructor con Concreto en 2010 y el Premio ACI a la Construcción en 2010.

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

*Título: En cada proyecto debemos esperar que los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión sean inferiores a la resistencia específica*



**Traductora:**  
*Iliana M. Gárza Gutiérrez*



**Revisor Técnico:**  
*Dr. Alejandro Durán Herrera*