

# Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete

by Subramanian Narayanan

National codes and specifications in North America, France, Japan, Australia, and New Zealand define cylinders as standard specimens for compressive strength testing of concrete, whereas much of the remainder of Europe and Asia relies on cube specimens. Per EN 206:2013, the characteristic compressive strength at the age of 28 days for normal strength concrete (NSC) is based on cylinders or cubes with 150 mm (6 in.) minimum dimensions.<sup>1</sup> However, retaining these specimen sizes as a standard for high-strength concrete (HSC) beyond 75 MPa (10,880 psi) and ultra-high-performance concrete (UHPC) may cause problems.

Two primary issues arise when using standard compression test machines to test HSC or UHPC: 1) the capacity of the testing machine may be insufficient; and 2) the ends of cylinders can require special preparation. In regard to the first issue, if the designed concrete strength is 100 MPa (14,500 psi), the maximum force that can be applied by a standard machine (about 2000 kN [449,620 lb]) may not be sufficient to crush a 150 x 300 mm (6 x 12 in.) cylinder or a 150 mm cube. Hence, smaller cylinders or cubes may be required. However, using test specimens with different shapes and sizes other than the standard sizes specified in the codes may lead to difficulty in correlation of compressive strength of concrete. Multi-axial compression stress-states vary with the slenderness of the test specimen,<sup>2</sup> and many researchers (refer to the following section) have found that cube specimens with smaller dimensions (for example, 100 mm [4 in.]) have higher strengths than specimens with larger dimensions (for example, 150 mm).

The second issue can be resolved using cube specimens in lieu of buying expensive grinding equipment to prepare cylinder ends. The combination of these solutions (using small cubes), however, is not considered standard practice in the concrete industry and may raise concerns about the accuracy and reliability of the test results.

## Previous Research

Many studies have been conducted on this topic in the past 100 years. As early as 1925, Gonnerman<sup>3</sup> investigated the relationship between various cylinder and cube sizes on the compressive strength of concrete. For standard concrete mixtures, at normal compressive strength levels, it was generally assumed that cubes will have a higher compressive strength than cylinders (up to 25%), but the difference will decrease with increasing strength levels.

There has been a series of research efforts in the past 40 years focused on such issues. In 1987, Nasser and Al-Manaseer<sup>4</sup> and Nasser and Kenyon in 1984<sup>5</sup> suggested that the 75 mm (3 in.) diameter cylinder results could be accepted as a standard compressive strength specimen. In 1994, Day<sup>6</sup> compiled research results from 22 separate studies and performed statistical analyses on the relationship between 75, 100, and 150 mm cylinders. In 2000, Issa et al.<sup>7</sup> investigated the effect of 50 to 150 mm (2 to 6 in.) cylinders on the compressive strength of concrete. In 1994, Aïtcin et al.<sup>8</sup> investigated the effects of size and curing on cylinder compressive strength of NSCs and HSCs up to 120 MPa (17,400 psi). In 2002, Mansur and Islam<sup>9</sup> investigated the relationship between 100 mm cylinders and 150 mm cubes and compressive strengths up to 100 MPa. The conclusions of these investigations are generally similar. As the specimen size increases, its compressive strength decreases. The strength of smaller cylinders or cubes was slightly higher than the strength expressed by the 150 mm diameter cylinder, and the strength differences decreased at higher compressive strengths. Also, the variation in the compressive strength increased with decreasing the specimen size. In 2008, Graybeal and Davis<sup>10</sup> conducted compressive strength tests on 51, 75, and 100 mm cylinders and 51, 70.7, and 100 mm cubes of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) with strength ranging from 80 to 200 MPa

(11,600 and 29,000 psi). They found that the 76 mm cylinder, as well as the 70.7 and 100 mm cubes, could be acceptable alternatives to the standard 100 mm cylinder specimens. They recommended the 70.7 mm cube specimens for situations where machine capacity, cylinder end preparation, or both are of concern.

A number of empirical models have also been developed from the test results, such as statistical size effect, fractal size effect, energetic size effect, and critical phase transition. A detailed study of previous research on these empirical models is presented by Talaat et al.<sup>11</sup>

### Cylinder versus Cube Strength

The main difference between cylinder and cube testing procedures is the need for capping cylinders. The ends of cast cylinders are usually not plane or sufficiently parallel to mate properly with the platens of compression testing machines, and hence are capped with sulfur, neoprene, or other suitable material for proper distribution of the applied load. Cubes, however, are not capped but cast in rigid molds with sides that are plane and parallel. When tested, they are flipped on their sides so that the machine platens mate properly with the cube surfaces. The factors affecting the cylinder/cube strength ratio are: 1) casting, curing, and testing procedures; 2) geometry of specimens; 3) strength levels; 4) direction of loading and characteristics of the machine; and 5) aggregate grading.<sup>12</sup>

Cylinders are considered to give a greater uniformity of results because their failure is less affected by the end restraint of the platens of the testing machine on the specimen. In addition, their strength is less influenced by the properties of the coarse aggregate used in the mixture; and the stress

distribution on horizontal planes in a cylinder is found to be more uniform than on cubes. Due to this reason, and because the standard cylinders have  $h/d$  of 2, the compressive strengths predicted by cylinders are more reliable than cubes. However, the strength of a cylinder is generally lower than that of a cube.<sup>3</sup> The higher cube strength is usually attributed to having an overlapped restrained zone in cubes under uniaxial compression (resulting in multi-axial stresses throughout the cube), while the cylinders have an unrestrained zone of  $0.268d$  in the middle portion.<sup>12</sup> Changing aggregate grading affects cube strength more than cylinder strength, and increasing aggregate coarseness decreases the cylinder/cube strength ratio.<sup>12</sup>

The standard cylinder strength  $f'_c$  is usually converted to standard cube strength  $f_{ck}$  by using the relation  $f'_c = 0.8 f_{ck}$ . In 1966, Neville<sup>13</sup> developed a relationship between the strength to the volume of a specimen ( $V$ ), lateral dimension ( $d$ ), and height to lateral dimension ratio ( $h/d$ ), which agreed well with the test data, up to 600 mm (24 in.) diameter. According to Neville, the coefficient  $K$  to convert cylinder strength to cube strength is

$$K = 0.76 + 0.2 \log \left( \frac{f'_c}{20} \right) \quad (1)$$

The conversion of cylinder to cube strength as per Eurocode 2<sup>14</sup> is compared with Eq. (1) in Table 1.

The cubic compressive strength of several specimens tested by Pacheco et al.<sup>15</sup> is compared in Fig. 1 with the ratio of cylinder/cube strength suggested by EN206<sup>1</sup>/Eurocode 2.<sup>14</sup> From this figure, a significant scatter between the cylinder/cube strength ratio ( $K$ ) of EN206<sup>1</sup>/Eurocode 2<sup>14</sup> and actual

**Table 1:**  
Conversion of cylinder to cube strength as per Eurocode 2<sup>14</sup> and Neville's equation<sup>13</sup>

Characteristic cylinder strength ( $f_{ck,cyl}$ ), N/mm <sup>2</sup>	Characteristic cube strength ( $f_{ck,cube}$ ), N/mm <sup>2</sup>	Ratio of cylinder/cube strength ( $K$ )	
		Eurocode 2	Eq. (1)
16	20	0.80	0.74
20	25	0.80	0.76
25	30	0.83	0.78
30	37	0.81	0.80
35	45	0.78	0.81
40	50	0.80	0.82
45	55	0.82	0.83
50	60	0.83	0.84
55	67	0.82	0.85
60	75	0.80	0.86
70	85	0.82	0.87
80	95	0.84	0.88
90	105	0.86	0.89
100	115	0.87	0.90

Note: 1 N/mm<sup>2</sup> = 145 psi

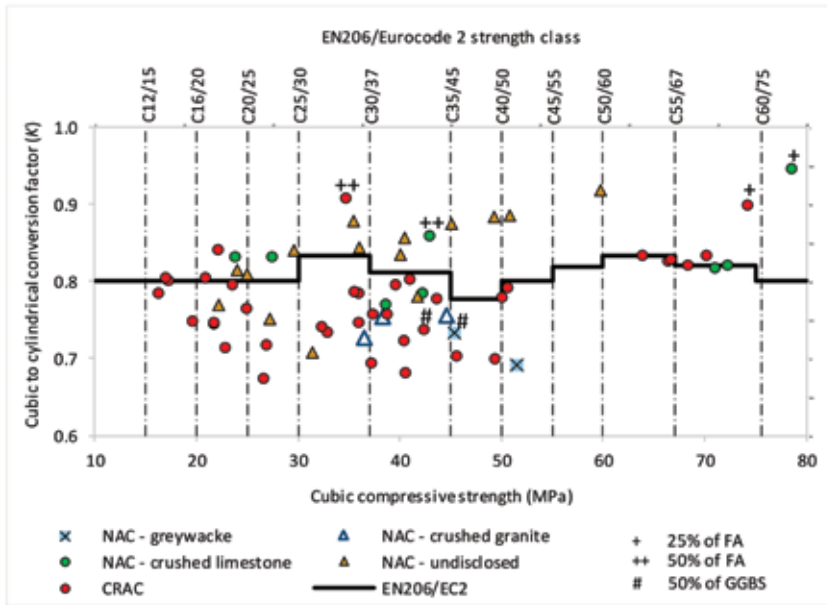


Fig. 1: Comparison of cylinder/cube strength factor with cube strength and EN206/Eurocode 2<sup>14</sup> suggested conversion (from Reference 15)

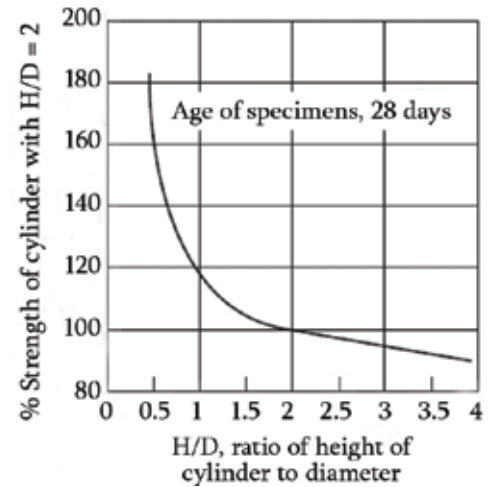


Fig. 2: Effect of height to diameter ratio ( $h/d$ ) on the strength of cylinders (from Reference 12)

data of both recycled aggregate concrete (RAC) and natural aggregate concrete (NAC) can be seen. From Fig. 1, it can be also observed that, when the compressive strength is below 50 MPa (7250 psi), the conversion factors of EN206/Eurocode 2<sup>14</sup> overestimate the strength of RAC cylinders, which may lead to unsafe designs. This means that a specific factor for RAC conversions is necessary. Pacheco et al.<sup>15</sup> found that incorporation of coarse recycled aggregate (CRA) sourced from concrete waste decreases  $K$ ; the values of  $K$  for NAC were in the range of 0.81 to 0.92, while most of RAC varied between 0.71 and 0.84.

### Difficulties of Testing High-Strength Specimen and Codes of Practices

From a practical standpoint, the compressive strength testing of 150 mm cylinders of M80 to M200 (11,600 to 29,000 psi) concretes may require both a 4500 kN (101,165 lb) compression machine and grinding of the ends of a cylinder, thus making the testing a specialized task, which is not possible in all testing laboratories.<sup>10</sup>

According to Graybeal and Davis,<sup>10</sup> only two countries have design guidelines pertaining to the testing of HSC using smaller-size specimens. The French specification<sup>16</sup> suggests the use of either 70 or 110 mm (2.75 or 4.3 in.) cylinders to determine the compressive strength, whereas the Japanese specification<sup>17</sup> suggests the use of 100 mm diameter cylinders. IS 1199 (Part 5):2018<sup>18</sup> suggests that either cube (of size 150 mm) or cylinder specimens (150 mm in diameter and 300 mm in length) can be used for determining the compressive strength. IS 1199 (Part 5)<sup>18</sup> allows 100 mm cubes also to be tested as an alternative, provided the largest nominal size of aggregates does not exceed 20 mm (3/4 in.). In addition,

smaller cylinder test specimens are also allowed, provided the cylinders have a minimum diameter to maximum nominal size of aggregate ratio of four. ACI 318M-19, Provision 26.12.1.1,<sup>19</sup> permits 100 x 200 mm (4 x 8 in.) or 150 x 300 mm test cylinders. As stated in the Code, the average difference between test results obtained by the two specimen sizes is not considered to be significant in design.<sup>20</sup>

### Conversion Factors for Different Shapes and Different Concretes

The pronounced effect of  $h/d$  and the cross-sectional dimension of test specimens on the compressive strength have been observed by several researchers. The difference in compressive strength of different sizes of specimens may be due to several factors such as St. Venant's effect, size effect, or lateral restraint effect due to the platen of testing machines. The size effect is more predominant when small-scale specimens are used. The general relationship observed between  $h/d$  and strength is shown in Fig. 2. It can be clearly seen that the strength ratio is more sensitive to  $h/d$  for  $h/d < 1.5$  than  $h/d > 1.5$ .<sup>12</sup>

When  $h/d$  of cylinders is less than 2.0, IS 516:1959<sup>21</sup> suggests a correction factor shown in Fig. 3. Standard cubes have been found to have higher compressive strength than standard cylinders with  $h/d$  of 2.0. The ratio of standard cylinder strength and standard cube strength is about 0.8 to 0.95; higher ratio is applicable for HSC. Similarly, 100 x 200 mm cylinders exhibit 2 to 10% higher strengths than 150 x 300 mm (6 x 12 in.) cylinders; the difference is less for higher strength concrete.<sup>10</sup>

The standard size of specimen for testing the compressive strength of concrete is a 150 x 300 mm cylinder. When such

cylinders with  $h/d$  of 2 and varying diameters were tested in compression, it was found that larger diameter cylinders had lower strength, as shown in Fig. 4. Thus, the average strength of 50 x 100 mm and 75 x 150 mm cylindrical specimens were 108 and 106%, respectively, when compared to the standard size specimens. When the diameter was increased beyond

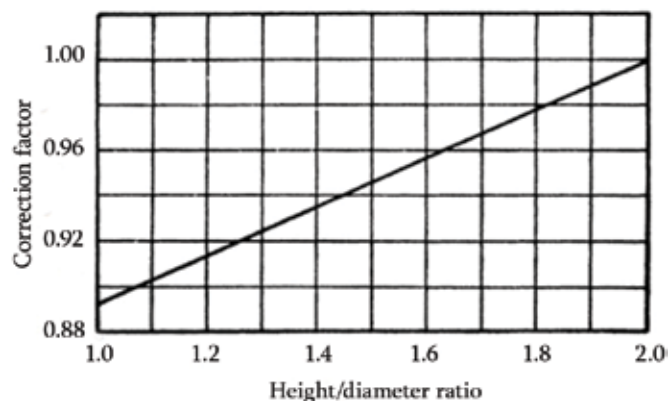


Fig. 3: Correction factor for  $h/d$  of cylinder per IS 516:1959<sup>21</sup>

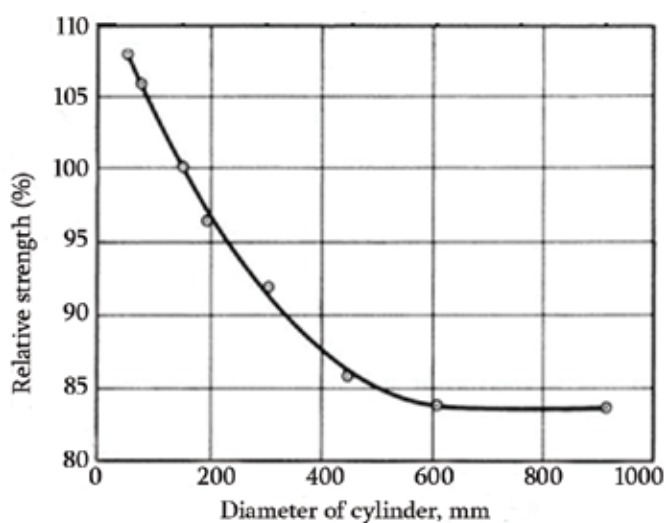


Fig. 4: Influence of the specimen diameter on concrete strength when  $h/d = 2$  (from Reference 22) (Note: 1 mm = 0.04 in.)

450 mm (18 in.), a much smaller reduction in strength was observed.

For NSC and HSC, appropriate conversion factors have been established by several researchers.<sup>2,23,24</sup> Thus, the results obtained from different size specimens can be related to a reference cylinder with  $h/d = 300/150$  (in mm) and can be used as the basis for structural design (per EN 1992-1-1:2004<sup>14</sup>). As shown in Fig. 5, NSC cylinder with  $h/d = 300/150$  (in mm) typically reaches only about 82% of the compressive strength of a 150 mm cube and only about 75% of the compressive strength of a 100 mm cube. However, these factors increase for HSC, and hence the difference in strength is smaller than that of NSC.

An investigation by Malaikah<sup>25</sup> on the shape and size effect on compressive strength of HSC proposed the following conversion factors: 0.8 for a 150 x 300 mm cylinder versus a 150 mm cube, 0.93 for a 100 x 200 mm cylinder versus a 150 mm cube, and 0.866 for a 150 x 300 cylinder versus a 100 x 200 mm cylinder.

Graybeal and Davis<sup>10</sup> evaluated 14 series of compression tests on HSC and UHPC mixtures, using premixtures without coarse aggregate and with compressive strengths ranging between 80 and 200 MPa. Each series included three sizes of cylinders ( $d = 51, 76,$  and  $102$  mm) with  $h/d = 2$  and three sizes of cubes (51, 70.7, and 100 mm). Most of the specimens were heat-treated, and some were cured in air. Comparison of mean compressive strengths obtained from cylinders with  $d = 102$  mm and 100 mm cubes resulted in conversion factors for cylinder-to-cube strength ratio of 1.00 for the UHPC mixtures (Table 2). From this table, it can be seen that in most cases, the compressive strength obtained from cylinders was higher than the compressive strength obtained from cubes.

### Wall Effect

When the maximum size of coarse aggregate in concrete is large with respect to the diameter of a cylinder or the size of a cube, the packing of coarse aggregate in the boundary layer between the wall of the mold and the concrete becomes less uniform. The concrete cannot be compacted sufficiently in these regions. It results in an increased quantity of mortar to fill the space between the coarse aggregate particles and the

**Table 2:**  
Conversion coefficients for HSC/UHPC specimens of different sizes (from Reference 10)

Tested specimens		Desired cylinder diameters	
		76 mm	102 mm
Cubes	100 mm	× 1.00 ( $R^2 = 0.9672$ )	× 1.00 ( $R^2 = 0.9791$ )
	70.7 mm	× 0.94 ( $R^2 = 0.9857$ )	× 0.93 ( $R^2 = 0.9694$ )
	51 mm	× 0.96 ( $R^2 = 0.9541$ )	× 0.96 ( $R^2 = 0.9472$ )
Cylinders	102 mm diameter	× 1.01 ( $R^2 = 0.9853$ )	—
	76 mm diameter	—	× 0.99 ( $R^2 = 0.9839$ )
	51 mm diameter	× 1.08 ( $R^2 = 0.9645$ )	× 1.07 ( $R^2 = 0.9360$ )

Note: 1 mm = 0.04 in.

wall of the mold. This phenomenon is known as the wall effect. To reduce this wall effect, ASTM C192/C192M, Section 6.4,<sup>26</sup> stipulates that the diameter of a test cylinder should be at least three times the nominal maximum size of the aggregate. The British Standard 1881: Part 108<sup>27</sup> suggests using 100 mm nominal size cubes for concrete with aggregates having a nominal size not exceeding 20 mm (3/4 in.), and 150 mm cubes for concretes with aggregates not exceeding 40 mm (1-1/2 in.).

Turkel and Ozkul<sup>28</sup> found that an optimum aggregate size exists that makes the size effect minimum; for NSC and HSC, they found that the size effect is minimum for 50 to 200 mm cubes for a 22 mm (3/4 in.) aggregate size. Carpinteri et al.<sup>29</sup> suggested that to minimize size effect, the codes should stipulate that the compressive strength should be conducted on specimens with a dimension greater than  $10d_{max}$ , where  $d_{max}$  is the maximum size of aggregates used.

### Size Effect Law

Bažant and Planas<sup>30</sup> proposed the following classical size effect law (SEL) based on fracture mechanics

$$\sigma_N = \frac{Bf'_t}{\sqrt{1 + \frac{d}{d_0}}} \quad (2)$$

where  $\sigma_N$  is the compressive strength,  $B$  and  $d_0$  are constants to be determined experimentally,  $f'_t$  is the strength parameter (taken as tensile strength), and  $d$  is the characteristic dimension of the structure (size of specimen). As per this size effect, when the size of the specimen is increased, the compressive strength of the specimens of the same mixture design decreases. There is a major problem with Eq. (2) though, as it predicts a severe strength reduction for larger specimens, which contradicts the actual test results. Another issue is that it's only applicable for structures having a notch or a crack initially.

Based on statistical analyses, Kim and Yi<sup>31</sup> developed the following size effect equation to predict the compressive strength of cylinder specimens, without considering the effect of maximum aggregate size

$$f_c = \frac{0.4f'_c}{\sqrt{1 + (h-d)/50}} + 0.8f'_c \quad (3)$$

where  $f_c$  is the strength of a nonstandard cylinder and  $f'_c$  is the strength of a standard cylinder both in MPa, and  $h$  is the height of a cylinder and  $d$  is the diameter of a cylinder both in mm. The proposed Eq. (3) showed good agreement with the existing test results for concrete cylinders and compared well with the results shown in Fig. 2.

It has been found that for cubes, the classical SEL expression may be modified to

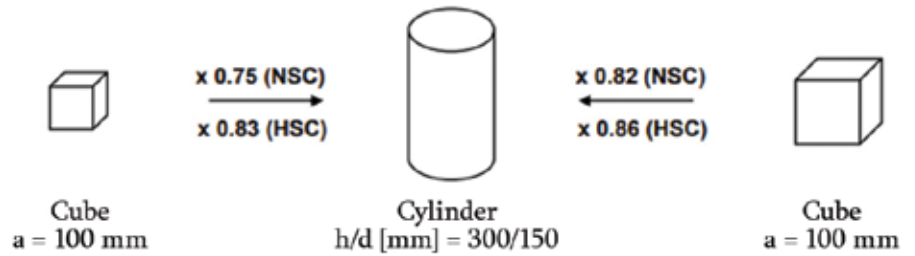


Fig. 5: Conversion factors for compressive strength of NSC and HSC for different specimen shapes and sizes (from Reference 24) (Note: 100 mm = 4 in.)

$$f_{cu} = f_{ck} \sqrt{\frac{L}{L + L_0}} \quad (4)$$

where  $f_{cu}$  is the strength of a nonstandard cube and  $f_{ck}$  is the strength of a standard cube both in MPa, and  $L$  is the size of a nonstandard cube and  $L_0$  is an empirically derived constant both in mm. The value of  $L_0$  has been found from experiments to be equal to 20 mm.

### Conclusions

The compressive strength of concrete is an important parameter used in structural design, as all other strengths are expressed in terms of the compressive strength. National codes suggest determining the compressive strength based on tests conducted on standard 150 x 300 mm cylinders or 150 mm cubes. However, these codes do not provide any correlation between the cube strength and the cylinder strength, although the cube strength is normally assumed to be 1.25 times the cylinder strength. Experiments have shown that the cylinder-to-cube strength ratio varies with the level of strength of concrete, with the difference narrowing for HSC. The cylinder-to-cube strength ratio suggested by Eurocode 2<sup>14</sup> is not in agreement with test data, as there is a large scatter in the results.

Keeping the previously mentioned specimen sizes as standard for HSC or UHPC may cause problems due to the higher ultimate loads required to break these cubes/cylinders and the limited capacity of available testing machines. Hence, smaller size cubes/cylinders are often used. Again, the correlation between these test results with the standard size cubes/cylinders are required as the values presented in the codes as compressive strength refer to the standard cube/cylinder sizes.

Based on the results of experimental investigations by various researchers on the compressive strength of various sizes of cylinders and cubes, the following conclusions can be drawn:

- The size effect is not constant for any specimen geometry. The size effect is more pronounced in cubic specimens than in cylindrical ones. It was found that the standard deviation of the strength decreased as the diameter increased. The strength in cylinders was observed to approach a constant value beyond 600 mm (27.5 in.);
- The strength ratio is more sensitive to  $h/d$  for  $h/d < 1.5$  than for  $h/d > 1.5$ . The influence of the specimen slenderness

decreases significantly with increasing concrete compressive strength. For UHPC, the ratio of compressive strength between cylinder and cube is close to 1.0.<sup>10</sup> Maximum aggregate size does not influence the ratio of compressive strength for UHPC.<sup>10</sup> When keeping the slenderness constant, compressive strength of NSC, HSC, and UHPC changes only marginally for different specimen sizes;

- There is no definite relation between the compressive strengths of various specimen shapes; only empirical conversions exist. Using such conversion factors, one must consider various parameters (including strength level, concrete type, aggregate size/gradation, capping, mold material, curing conditions, consolidation methods, and specimen age) affecting these conversions to choose the most suitable factor<sup>11</sup>;
- Cylinders with 100 mm and 76 mm diameters and cubes with 100 mm sides are acceptable and interchangeable test specimens for the determination of the compressive strength of UHPFRC<sup>10</sup>; and
- The size effect in HSC is not yet fully understood. Debate exists for whether the size effect is more pronounced in lower- or higher-strength concrete.<sup>11</sup>

## References

1. EN 206:2013, "Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity," European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2013, 98 pp.
2. Bonzel, J., "Zur Gestaltsabhängigkeit der Betondruckfestigkeit," *Beton- und Stahlbetonbau*, V. 54, No. 9 and 10, 1959, pp. 223-228 and pp. 247-248, respectively.
3. Gonneman, H.F., "Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete," *ASTM Proceedings*, V. 25, Part 2, 1925, pp. 237-250.
4. Nasser, K.W., and Al-Manaseer, A.A., "It's Time for a Change from 6 x 12- to 3 x 6-in. Cylinders," *ACI Materials Journal*, V. 84, No. 3, May-June 1987, pp. 213-216.
5. Nasser, K.W., and Kenyon, J.C., "Why Not 3 x 6 Inch Cylinders for Testing Concrete Compressive Strength?" *ACI Materials Journal*, V. 81, No. 1, Jan.-Feb. 1984, pp. 47-53.
6. Day, R. "Strength Measurement of Concrete Using Different Cylinder Sizes: A Statistical Analysis," *Cement, Concrete, and Aggregates*, V. 16, No. 1, June 1994, pp. 21-30.

7. Issa, S.A.; Islam, M.S.; Issa, M.A.; and Yousif, A.A., "Specimen and Aggregate Size Effect on Concrete Compressive Strength," *Cement, Concrete, and Aggregates*, V. 22, No. 2, Dec. 2000, pp. 103-115.

8. Aïtcin, P.-C.; Miao, B.; Cook, W.D.; and Mitchell, D., "Effects of Size and Curing on Cylinder Compressive Strength of Normal and High Strength Concretes," *ACI Materials Journal*, V. 91, No. 4, July-Aug. 1994, pp. 349-354.

9. Mansur, M.A., and Islam, M.M., "Interpretation of Concrete Strength for Nonstandard Specimens," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 14, No. 2, Mar.-Apr. 2002, pp. 151-155.

10. Graybeal, B., and Davis, M., "Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 105, No. 6, Nov.-Dec. 2008, pp. 603-609.

11. Talaat, A.; Emad, A.; Tarek, A.; Masbouba, M.; Essam, A.; and Kohail, M., "Factors Affecting the Results of Concrete Compression Testing: A Review," *Ain Shams Engineering Journal*, V. 12, No. 1, Mar. 2021, pp. 205-221.

12. Elwell, D.J., and Fu, G., "Compression Testing of Concrete: Cylinders vs. Cubes," Report FHWA/NY/SR-45/119, Transportation Research and Development Bureau, New York State Department of Transportation, Albany, NY, Mar. 1995, 22 pp.

13. Neville, A.M., "A General Relation for Strengths of Concrete Specimens of Different Shapes and Sizes," *ACI Journal, Proceedings*, V. 63, No.10, Oct. 1966, pp. 1095-1110.

14. EN 1992-1-1:2004/AC: 2010, "Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings," European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2010, 225 pp.

15. Pacheco, J.; de Brito, J.; Chastre, C.; and Evangelista, L., "Probabilistic Conversion of the Compressive Strength of Cubes to Cylinders of Natural and Recycled Aggregate Concrete Specimens," *Materials*, V. 12, No. 2, Jan. 2019, pp. 280-291.

16. "Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes—Interim Recommendations," Association Française de Génie Civil (AFGC), Paris, France, 2002, 152 pp.

17. "Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures," Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 2004, 167 pp.

18. IS 1199 (Part 5) : 2018, "Fresh Concrete—Methods of Sampling, Testing and Analysis, Part 5 Making and Curing of Test Specimens," First revision, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 2018, 12 pp.

19. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-19) and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 624 pp.

20. Carino, N.J.; Guthrie, W.F.; Lagergren, E.S.; and Mullings, G.M., "Effects of Testing Variables on the Strength of High-Strength (90 MPa) Concrete Cylinders," *High-Performance Concrete – Proceedings, International Conference, Singapore, 1994*, SP-149, V.M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1994, pp. 589-632.

21. IS 516 - 1959, "Methods of Tests for Strength of Concrete," Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 1959, 25 pp.

22. "Concrete Manual," U.S. Bureau of Reclamation, Washington, DC, 1975, pp. 574-575.

23. Walz, K., Gestaltfestigkeit von Betonkörpern, German Committee

Advertise


in Ci

For more information, contact

Dan Kaste, Account Executive

Email: dan.kaste@wearemci.com

MCI USA +1.410.584.8355



for Structural Concrete (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb), No. 122, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 1957.

24. Riedel, P., and Leutbecher, T., “Effect of Specimen Size on the Compressive Strength of Ultra-High Performance Concrete,” *AFGC-ACI-fib-RILEM International. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, UHPFRC 2017, Montpellier, France, Oct. 2-4, 2017, pp. 251-260.

25. Malaikah, M.A.S., “Effect of Specimen Size and Shape on the Compressive Strength of High Strength Concrete,” *Pertanika Journal of Science and Technology*, V. 13, No. 1, 2005, pp. 87-96.

26. ASTM C192/C192M-19, “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 8 pp.

27. BS 1881: Part 108: 1983, “Testing Concrete, Part 108: Method for Making Test Cubes from Fresh Concrete,” British Standard Institution, United Kingdom, 1983, 10 pp.

28. Turkel, A., and Ozkul, M.H., “Size and Wall Effects on Compressive Strength of Concretes,” *ACI Materials Journal*, V. 107, No. 4, July-Aug. 2010, pp. 372-379.

29. Carpinteri, A.; Ferro, G.; and Monetto, I., “Scale Effects in Uniaxially Compressed Concrete Specimens,” *Magazine of Concrete Research*, V. 51, No. 3, June 1999, pp. 217-225.

30. Bazant, Z.P., and Planas, J., *Fracture and Size Effect in Concrete*

and *Other Quasibrittle Materials*, first edition, CRC Press, 1998, 640 pp.

31. Kim, J.-K., and Yi, S.-T., “Application of Size Effect to Compressive Strength of Concrete Members,” *Sādhanā*, V. 27, Part 4, Aug. 2002, pp. 467-484.

Selected for reader interest by the editors.



ACI member **Subramanian Narayanan** is a Consultant currently living in Maryland, USA. He is the former Chief Executive of Computer Design Consultants, India. He has 45 years of professional experience, including consulting, research, and teaching in India and abroad. Narayanan has authored 25 books and 300 technical papers and served as a past Vice President of the Indian Concrete Institute and the Association of Consulting Civil Engineers India. He has also been a member of the editorial board/review committees of several Indian and international journals. He received his doctorate from the Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India.

# NEW and UPDATED ACI Specifications



## Specifications for Concrete Construction

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

## Field Reference Manual

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



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



# Efecto del tamaño y forma de la probeta en la resistencia a la compresión del concreto

por Subramanian Narayanan

Los códigos y especificaciones nacionales de América del Norte, Francia, Japón, Australia y Nueva Zelanda definen las probetas cilíndricas como muestras estándar para ensayos de resistencia a la compresión del concreto, mientras que gran parte del resto de Europa y Asia se basa en probetas cúbicas. Según EN 206:2013, la resistencia a la compresión característica a la edad de 28 días para concreto de resistencia normal (CRN) se basa en probetas cilíndricas o cúbicas con dimensiones mínimas de 150 mm (6 pulg.<sup>1</sup>). Sin embargo, conservar estos tamaños de muestra como estándar para concreto de alta resistencia (CAR) más allá de 75 MPa (10,880 psi) y concreto de ultra alto desempeño (CUAD) puede causar problemas.

Surgen dos problemas principales cuando se utilizan máquinas de prueba de compresión estándar para probar CAR o CUAD: 1) la capacidad de la máquina de prueba puede ser insuficiente; y 2) los extremos de las probetas cilíndricas pueden requerir una preparación especial. Con respecto a la primera cuestión, si la resistencia del concreto de diseño es de 100 MPa (14,500 psi), la fuerza máxima que puede aplicar una máquina estándar (alrededor de 2,000 kN [449,620 lb]) puede ser insuficiente para aplastar una probeta cilíndrica de 150 x 300 mm. (6 x 12 pulg.) o un cubo de 150 mm. Por lo tanto, es posible que se requieran probetas cilíndricas o cúbicas más pequeñas. Sin embargo, el uso de probetas con formas y tamaños diferentes de los tamaños estándar especificados en los códigos puede generar dificultades en la correlación de la resistencia a la compresión del concreto. Los estados de esfuerzo de compresión multiaxial varían con la esbeltez de la probeta<sup>2</sup>, y muchos investigadores (ver la siguiente sección) han descubierto que las probetas cúbicas con dimensiones más pequeñas (por ejemplo, 100 mm [4 pulgadas]) tienen resistencias más altas que probetas con dimensiones mayores (por ejemplo, 150 mm).

El segundo problema se puede resolver utilizando probetas cúbicas en lugar de comprar costosos equipos de rectificación para preparar los extremos de las probetas cilíndricas. Sin embargo, la combinación de estas soluciones (utilizando probetas cúbicas pequeñas) no se considera una práctica estándar en la industria del concreto y puede generar preocupaciones sobre la precisión y fiabilidad de los resultados de las pruebas.

## Investigaciones Previas

Se han realizado muchos estudios sobre este tema en los últimos 100 años. Ya en 1925, Gonnerman<sup>3</sup> investigó la relación entre varios tamaños de probetas cilíndricas y cúbicas y la resistencia a la compresión del concreto. Para mezclas de concreto estándar, a niveles normales de resistencia a la compresión, generalmente se asumió que las probetas cúbicas tendrán una resistencia a la compresión mayor que las probetas cilíndricas (hasta 25%), pero la diferencia disminuirá al aumentar los niveles de resistencia.

En los últimos 40 años ha habido una serie de esfuerzos en investigación centrados en estos temas. En 1987, Nasser y Al-Manaseer<sup>4</sup> y Nasser y Kenyon en 1984<sup>5</sup> sugirieron que los resultados de las probetas cilíndricas de 75 mm (3 pulgadas) de diámetro podrían aceptarse como una muestra estándar de resistencia a la compresión. En 1994, Day<sup>6</sup> recopiló resultados de investigación de 22 estudios distintos y realizó análisis estadísticos sobre la relación entre probetas cilíndricas de 75, 100 y 150 mm.



En 2000, Issa et al.<sup>7</sup> investigaron el efecto de probetas cilíndricas de 50 a 150 mm (2 a 6 pulgadas) sobre la resistencia a la compresión del concreto. En 1994, Aitcin et al.<sup>8</sup> investigaron los efectos del tamaño y el curado sobre la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de CRN y CAR de hasta 120 MPa (17,400 psi). En 2002, Mansur e Islam<sup>9</sup> investigaron la relación entre probetas cilíndricas de 100 mm y cúbicas de 150 mm y resistencias a la compresión de hasta 100 MPa. Las conclusiones de estas investigaciones son en general similares. A medida que aumenta el tamaño de la probeta, disminuye su resistencia a la compresión. La resistencia de las probetas cilíndricas y cúbicas más pequeñas fue ligeramente mayor que la resistencia expresada por la probeta cilíndrica de 150 mm de diámetro, y las diferencias de resistencia disminuyeron a resistencias a la compresión más altas. Además, la variación en la resistencia a la compresión aumentó al disminuir el tamaño de la probeta. En 2008, Graybeal y Davis<sup>10</sup> realizaron pruebas de resistencia a la compresión en probetas cilíndricas de 51, 75 y 100 mm y cúbicas de 51, 70, 7 y 100 mm de concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibra (CUADRF) con resistencias que oscilaban entre 80 y 200 MPa (11,600 y 29,000 psi). Descubrieron que la probeta cilíndrica de 76 mm, así como las cúbicas de 70.7 y 100 mm, podrían ser alternativas aceptables a las probetas cilíndricas estándar de 100 mm. Recomendaron las probetas cúbicas de 70.7 mm para situaciones en las que la capacidad de la máquina, la preparación del extremo de la probeta o ambas son motivo de preocupación.

También se han desarrollado varios modelos empíricos a partir de los resultados de las probetas, como el efecto de tamaño estadístico, el efecto de tamaño fractal, el efecto de tamaño energético y la transición de fase crítica. Talaat et al.<sup>11</sup> presentan un estudio detallado de investigaciones previas sobre estos modelos empíricos.

## Resistencia del cilindro frente al cubo

La principal diferencia entre los procedimientos de prueba de probetas cilíndricas y cúbicas es la necesidad de recubrir las probetas cilíndricas. Los extremos de las probetas cilíndricas colados generalmente no son planos o suficientemente paralelos para acoplarse adecuadamente con los platos de las máquinas de prueba de compresión y, por lo tanto, son cubiertos con tapados de azufre, neopreno u otro material adecuado para una distribución adecuada de la carga aplicada. Las cúbicas, sin embargo, no son recubiertas, sino que se moldean en moldes rígidos con lados planos y paralelos. Cuando se ensayan, se voltean de lado para que los platos de la máquina se acoplen correctamente con las superficies del cubo. Los factores que afectan la relación de resistencia cilindro/cubo son: 1) procedimientos de colocación, curado y ensayo; 2) geometría de las probetas; 3) niveles de esfuerzo; 4) dirección de la carga y características de la máquina; y 5) clasificación de los agregados<sup>12</sup>.

Se considera que las probetas cilíndricas dan una mayor uniformidad en los resultados porque su falla se ve menos afectada por la restricción final de las placas de la máquina de ensayo sobre la muestra. Además, su resistencia está menos influenciada por las propiedades del agregado grueso utilizado en la mezcla; y se encuentra que la distribución de esfuerzos en los planos horizontales de un cilindro es más uniforme que en los cubos. Por esta razón, y debido a que las probetas cilíndricas estándar tienen  $h/d$  de 2, las resistencias a la compresión proyectadas para las probetas cilíndricas son más confiables que las de las cúbicas. Sin embargo, la resistencia de una probeta cilíndrica es generalmente menor que la de una cúbica<sup>3</sup>. La mayor resistencia de la probeta cúbica generalmente se atribuye a tener una zona restringida superpuesta en los cubos bajo compresión uniaxial (lo que resulta en esfuerzos multiaxiales en todo el cubo), mientras que las probetas cilíndricas tienen una zona libre de  $0.268d$  en la porción media<sup>12</sup>. Cambiar la clasificación del agregado afecta la resistencia de la probeta cúbica más que la resistencia de la cilíndrica, y el aumento del tamaño del agregado disminuye la relación de resistencia de la probeta cilíndrica/cúbica<sup>12</sup>.

La resistencia estándar de la probeta cilíndrica  $f'_c$  generalmente se convierte a la resistencia estándar de la probeta cúbica  $f'_{ck}$  usando la relación  $f'_c = 0.8 f'_{ck}$ . En 1966, Neville<sup>13</sup> desarrolló una relación entre la resistencia y el volumen de una muestra ( $V$ ), la dimensión lateral ( $d$ ) y la relación entre la altura y las dimensiones laterales ( $h/d$ ), que coincidía bien con los datos de pruebas, hasta 600 mm. (24 pulg.)

de diámetro. Según Neville, el coeficiente  $K$  para convertir la resistencia de la probeta cilíndrica en la resistencia de la probeta cúbica es

$$K = 0.76 + 0.2 \log\left(\frac{f_c}{20}\right) \quad (1)$$

La conversión de resistencia de la probeta cilíndrica a cúbica según el Eurocódigo 2<sup>14</sup> se compara con la ecuación (1) en la Tabla 1.

La resistencia a la compresión cúbica de varias probetas ensayadas por Pacheco et al.<sup>15</sup> se comparan en la Fig. 1 con la relación de resistencia cilindro/cubo sugerido por EN206<sup>1</sup>/Eurocódigo 2<sup>14</sup>. A partir de esta figura, se observa una dispersión significativa entre la relación de resistencia cilindro/cubo ( $K$ ) de EN206<sup>1</sup>/Eurocódigo 2<sup>14</sup> y se pueden ver datos reales tanto del concreto de agregados reciclados (CAR) como del concreto de agregados naturales (CAN). En la Fig. 1, también se puede observar que, cuando la resistencia a la compresión es inferior a 50 MPa (7,250 psi), los factores de conversión de EN206<sup>1</sup>/Eurocódigo 2<sup>14</sup> sobreestiman la resistencia de las probetas cilíndricas de CAR, lo que puede conducir a diseños inseguros. Esto significa que es necesario un factor específico para las conversiones de CAR. Pacheco et al.<sup>15</sup> encontraron que la incorporación de agregado grueso reciclado (AGR) proveniente de residuos de concreto disminuye el  $K$ ; los valores de  $K$  para CAN estuvieron en el rango de 0.81 a 0.92, mientras que la mayoría de CAR variaron entre 0.71 y 0.84.

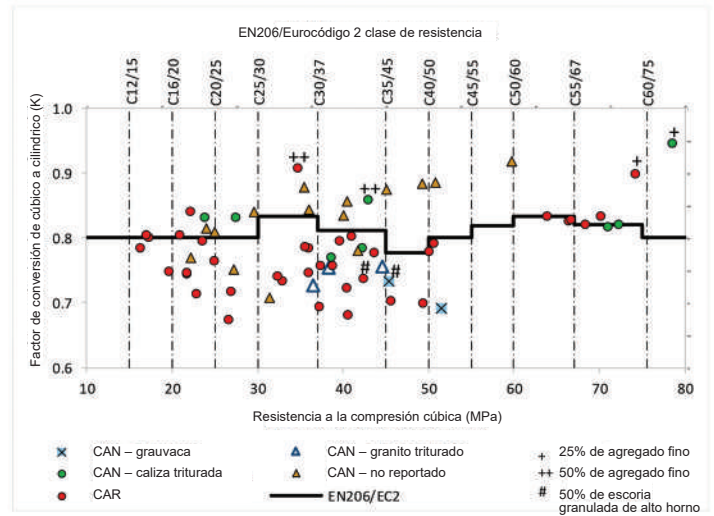


Fig. 1 Comparación del factor de resistencia del cilindro/cubo con la resistencia del cubo y la conversión sugerida por EN206<sup>1</sup>/Eurocódigo 2<sup>14</sup> (de la Referencia 15).

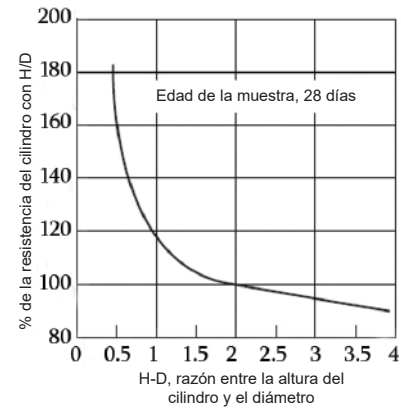


Fig. 2 Efecto de la relación altura-diámetro ( $h/d$ ) sobre la resistencia de las probetas cilíndricas (de la Referencia 12).

Tabla 1:

Conversión de resistencia de cilindro a cubo según el Eurocódigo 214 y la ecuación de Neville<sup>13</sup>

Resistencia característica del cilindro ( $f_{ck,cyl}$ ), N/mm <sup>2</sup>	Resistencia característica del cubo ( $f_{ck,cube}$ ), N/mm <sup>2</sup>	Relación de resistencia del cilindro/cubo ( $K$ )	
		Eurocode 2	Ec. (1)
16	20	0.80	0.74
20	25	0.80	0.76
25	30	0.83	0.78
30	37	0.81	0.80
35	45	0.78	0.81
40	50	0.80	0.82
45	55	0.82	0.83
50	60	0.83	0.84
55	67	0.82	0.85
60	75	0.80	0.86
70	85	0.82	0.87
80	95	0.84	0.88
90	105	0.86	0.89
100	115	0.87	0.90

Nota: 1 N/mm<sup>2</sup> = 145 psi

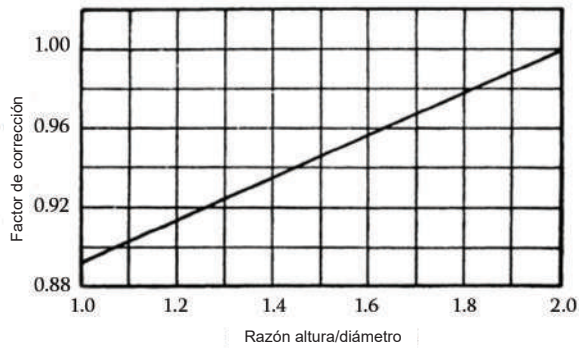


Fig. 3 Factor de corrección para  $h/d$  del cilindro según IS 516:1959<sup>21</sup>.

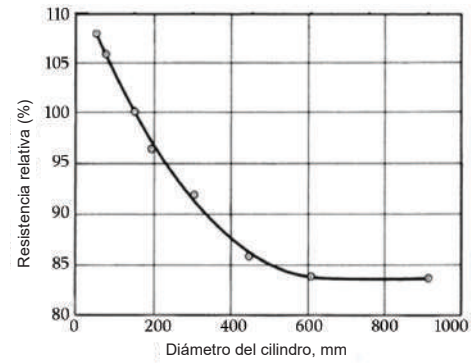


Fig. 4 Influencia del diámetro de la muestra en la resistencia del concreto cuando  $h/d = 2$  (de la Referencia 22) (Nota: 1 mm = 0.04 pulg.).

## Dificultades de ensayar probetas de alta resistencia y códigos de prácticas

Desde un punto de vista práctico, la prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de 150 mm de concreto M80 a M200 (11,600 a 29,000 psi) puede requerir tanto una máquina de compresión de 4500 kN (101,165 lb) como un rectificado de los extremos del cilindro, lo que hace que la prueba sea una tarea especializada, que no es posible en todos los laboratorios de pruebas<sup>10</sup>.

Según Graybeal y Davis<sup>10</sup>, sólo dos países tienen directrices de diseño relativas a las pruebas de CAR utilizando probetas de menor tamaño. La especificación francesa<sup>16</sup> sugiere el uso de probetas cilíndricas de 70 o 110 mm (2.75 o 4.3 pulgadas) para determinar la resistencia a la compresión, mientras que la especificación japonesa<sup>17</sup> sugiere el uso de probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro. IS 1199 (Parte 5):2018<sup>18</sup> sugiere que se pueden utilizar probetas cúbicas (de tamaño 150 mm) o cilíndricas (150 mm de diámetro y 300 mm de longitud) para determinar la resistencia a la compresión. IS 1199 (Parte 5)<sup>18</sup> permite que también se ensayen probetas cúbicas de 100 mm como alternativa, siempre que el tamaño nominal más grande de los agregados no supere los 20 mm (3/4 pulg.). Además, también se permiten probetas cilíndricas más pequeñas, siempre que las probetas cilíndricas tengan una proporción de agregado de cuatro entre el diámetro mínimo y el tamaño nominal máximo de agregado. ACI 318M-19, disposición 26.12.1.1<sup>19</sup>, permite las probetas cilíndricas de 100 x 200 mm (4 x 8 pulgadas) o 150 x 300 mm. Como se establece en el Código, la diferencia promedio entre los resultados de las pruebas obtenidas con los dos tamaños de probetas no se considera significativa en el diseño<sup>20</sup>.

## Factores de conversión para diferentes formas y diferentes concretos

Varios investigadores han observado el efecto pronunciado de  $h/d$  y la dimensión de la sección transversal de las probetas sobre la resistencia a la compresión. La diferencia en la resistencia a la compresión de diferentes tamaños de probetas puede deberse a varios factores, como el efecto de St. Venant, el efecto de tamaño o el efecto de restricción lateral debido a la platina de las máquinas de ensayo. El efecto del tamaño es más predominante cuando se utilizan probetas de pequeña escala. La relación general observada entre  $h/d$  y la resistencia se muestra en la Fig. 2. Se puede ver claramente que la relación de resistencia es más sensible a  $h/d$  para  $h/d < 1.5$  que  $h/d > 1.5$ <sup>12</sup>.

Cuando  $h/d$  de las probetas cilíndricas es inferior a 2.0, la norma IS 516:1959<sup>21</sup> sugiere un factor de corrección que se muestra en la Fig. 3. Se ha descubierto que los cubos estándar tienen una mayor resistencia a la compresión que las probetas cilíndricas estándar con  $h/d$  de 2.0. La relación entre la resistencia del cilindro estándar y la resistencia del cubo estándar es de aproximadamente 0.8 a 0.95; se aplica una relación más alta para CAR. De manera similar, las probetas cilíndricas de 100 x 200 mm exhiben resistencias entre un 2 y un 10 % mayores que las probetas cilíndricas de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg.); la diferencia es menor para el concreto de mayor resistencia<sup>10</sup>.

El tamaño estándar de muestra para probar la resistencia a la compresión del concreto es un cilindro de 150 x 300 mm. Cuando se probaron en compresión las probetas cilíndricas con  $h/d$  de 2 y diámetros variables, se encontró que las probetas cilíndricas de mayor diámetro tenían menor resistencia, como

se muestra en la Fig. 4. Por lo tanto, la resistencia promedio de 50 x 100 mm y 75 x 150 mm. Las probetas cilíndricas fueron 108 y 106%, respectivamente, en comparación con las probetas de tamaño estándar. Cuando el diámetro se aumentó más allá de 450 mm (18 pulgadas), se observó una reducción mucho menor en la resistencia.

Para CRN y CAR, varios investigadores han establecido factores de conversión apropiados<sup>2,23,24</sup>. Por lo tanto, los resultados obtenidos de probetas de diferentes tamaños pueden relacionarse con un cilindro de referencia con  $h/d = 300/150$  (en mm) y pueden utilizarse como base para el diseño estructural (según EN 1992-1-1:2004<sup>14</sup>). Como se muestra en la Fig. 5, el cilindro CRN con  $h/d = 300/150$  (en mm) normalmente alcanza sólo aproximadamente el 82% de la resistencia a la compresión de un cubo de 150 mm y sólo aproximadamente el 75% de la resistencia a la compresión de un cubo de 100 mm. Sin embargo, estos factores aumentan para CAR y, por lo tanto, la diferencia de resistencia es menor que la de CRN.

Una investigación realizada por Malaikah<sup>25</sup> sobre el efecto de la forma y el tamaño sobre la resistencia a la compresión del CAR propuso los siguientes factores de conversión: 0.8 para un cilindro de 150 x 300 mm versus un cubo de 150 mm, 0.93 para un cilindro de 100 x 200 mm versus un cubo de 150 mm, y 0.866 para un cilindro de 150 x 300 frente a un cilindro de 100 x 200 mm.

Graybeal y Davis<sup>10</sup> evaluaron 14 series de ensayos de compresión sobre mezclas de CAR y CUAD, utilizando premezclas sin agregado grueso y con resistencias a la compresión que oscilaban entre 80 y 200 MPa. Cada serie incluía tres tamaños de probetas cilíndricas ( $d = 51, 76$  y  $102$  mm) con  $h/d = 2$  y tres tamaños de probetas cúbicas (51, 70,7 y 100 mm). La mayoría de las probetas fueron tratadas térmicamente y algunas se curaron al aire. La comparación de las resistencias a la compresión medias obtenidas de probetas cilíndricas con  $d = 102$  mm y cubos de 100 mm dio como resultado factores de conversión para la relación de resistencia cilindro-cubo de 1.00 para las mezclas de CUAD (Tabla 2). De esta tabla se puede ver que, en la mayoría de los casos, la resistencia a la compresión obtenida de las probetas cilíndricas fue mayor que la resistencia a la compresión obtenida de las cúbicas.

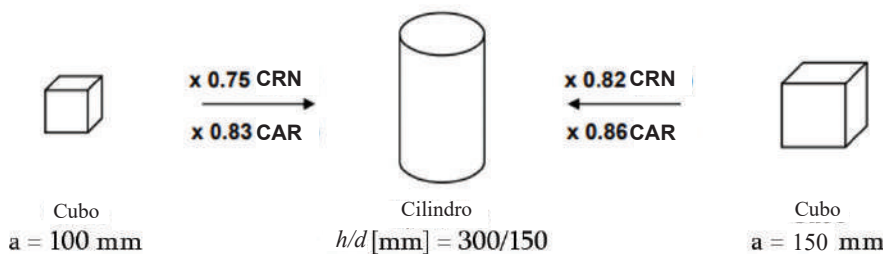
**Tabla 2:**  
**Coefficientes de conversión para probetas de CAR/CUAD de diferentes tamaños (de la Referencia 10)**

Probetas ensayadas		Diámetros deseados del cilindro	
		76 mm	102 mm
Cubos	100 mm	× 1.00 ( $R^2 = 0.9672$ )	× 1.00 ( $R^2 = 0.9791$ )
	70.7 mm	× 0.94 ( $R^2 = 0.9857$ )	× 0.93 ( $R^2 = 0.9694$ )
	51 mm	× 0.96 ( $R^2 = 0.9541$ )	× 0.96 ( $R^2 = 0.9472$ )
Cilindros	102 mm diámetro	× 1.01 ( $R^2 = 0.9853$ )	—
	76 mm diámetro	—	× 0.99 ( $R^2 = 0.9839$ )
	51 mm diámetro	× 1.08 ( $R^2 = 0.9645$ )	× 1.07 ( $R^2 = 0.9360$ )

Nota: 1 mm = 0.04 in.

## Efecto de Muro

Cuando el tamaño máximo del agregado grueso en el concreto es grande con respecto al diámetro de un cilindro o al tamaño de un cubo, el empaquetamiento del agregado grueso en la capa límite entre la pared del molde y el concreto se vuelve menos uniforme. En estas zonas el concreto no se puede compactar lo suficiente. Da como resultado una mayor cantidad de mortero para llenar el espacio entre las partículas de agregado grueso y la pared del molde. Este fenómeno se conoce como efecto pared. Para reducir este efecto de pared, ASTM C192/C192M, Sección 6.4<sup>26</sup>, estipula que el diámetro de una probeta cilíndrica debe ser al menos tres veces el tamaño máximo nominal del agregado. La norma británica 1881: Parte 108<sup>27</sup> sugiere usar cubos de tamaño nominal de 100 mm para concreto con agregados que tengan un tamaño nominal que no exceda los 20 mm (3/4 pulg.), y cubos de 150 mm para concretos con agregados que no excedan los 40 mm (1-1/2 pulg.).



**Fig. 5: Factores de conversión para la resistencia a la compresión de CRN y CAR para diferentes formas y tamaños de probetas (de la Referencia 24) (Nota: 100 mm = 4 pulg.).**

Turkel y Ozkul<sup>28</sup> encontraron que existe un tamaño de agregado óptimo que hace que el efecto del tamaño sea mínimo; para CRN y CAR, encontraron que el efecto del tamaño es mínimo para cubos de 50 a 200 mm para un tamaño de agregado de 22 mm (3/4 pulg.). Carpinteri et al.<sup>29</sup> sugirieron que, para minimizar el efecto del tamaño, los códigos deberían estipular que la resistencia a la compresión debería realizarse en especímenes con una dimensión mayor que  $10d_{max}$ , donde  $d_{max}$  es el tamaño máximo de agregados utilizados.

### Ley del efecto del tamaño

Bazant y Planas<sup>30</sup> propusieron la siguiente ley clásica del efecto del tamaño basada en la mecánica de fracturas

$$\sigma_N = \frac{Bf'_t}{\sqrt{1+\frac{d}{d_0}}} \quad (2)$$

donde  $\sigma_N$  es la resistencia a la compresión,  $B$  y  $d_0$  son constantes que se determinarán experimentalmente,  $f'_t$  es el parámetro de resistencia (tomado como resistencia a la tracción) y  $d$  es la dimensión característica de la estructura (tamaño de la muestra). Según este efecto de tamaño, cuando se aumenta el tamaño de la muestra, la resistencia a la compresión de las probetas del mismo diseño de mezcla disminuye. Hay un problema importante con la ecuación (2), ya que predice una severa reducción de la resistencia para probetas más grandes, lo que contradice los resultados reales de las pruebas. Otro problema es que sólo es aplicable a estructuras que inicialmente tienen una muesca o una grieta.

Con base en análisis estadísticos, Kim y Yi<sup>31</sup> desarrollaron la siguiente ecuación del efecto del tamaño para predecir la resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas, sin considerar el efecto del tamaño máximo del agregado.

$$f_c = \frac{0.4f'_c}{\sqrt{1+(h-d)/50}} + 0.8f'_c \quad (3)$$

donde  $f_c$  es la resistencia de un cilindro no estándar y  $f'_c$  es la resistencia de un cilindro estándar, ambos en MPa, y  $h$  es la altura de un cilindro y  $d$  es el diámetro de un cilindro, ambos en mm. La ecuación propuesta (3) mostró una buena concordancia con los resultados de las pruebas existentes para probetas cilíndricas de concreto y se comparó bien con los resultados mostrados en la Fig. 2.

Se ha descubierto que, para cubos, la expresión de la ley clásica del efecto del tamaño puede modificarse para

$$f_{cu} = f_{ck} \sqrt{\frac{L}{L+L_0}} \quad (4)$$

donde  $f_{cu}$  es la resistencia de un cubo no estándar y  $f_{ck}$  es la resistencia de un cubo estándar, ambas en MPa, y  $L$  es el tamaño de un cubo no estándar y  $L_0$  es una constante derivada empíricamente, ambas en mm. Experimentalmente se ha demostrado que el valor de  $L_0$  es igual a 20 mm.

## Conclusiones

La resistencia a la compresión del concreto es un parámetro importante utilizado en el diseño estructural, ya que todas las demás resistencias se expresan en términos de resistencia a la compresión. Los códigos nacionales sugieren determinar la resistencia a la compresión basándose en pruebas realizadas en probetas cilíndricas estándar de 150 x 300 mm o cubos de 150 mm. Sin embargo, estos códigos no proporcionan ninguna correlación entre la resistencia del cubo y la resistencia del cilindro, aunque normalmente se supone que la resistencia del cubo es 1.25 veces la resistencia del cilindro. Los experimentos han demostrado que la relación de resistencia del cilindro al cubo varía con el nivel de resistencia del concreto, y la diferencia se reduce para el CAR. La relación de resistencia cilindro-cubo sugerida por el Eurocódigo 2<sup>14</sup> no concuerda con los datos de las pruebas, ya que hay una gran dispersión en los resultados.

Mantener los tamaños de muestra mencionados anteriormente como estándar para CAR o CUAD puede causar problemas debido a las mayores cargas finales requeridas para romper estas probetas cúbicas/cilíndricas y la capacidad limitada de las máquinas de prueba disponibles. Por lo tanto, a menudo se utilizan probetas cúbicas/cilíndricas de menor tamaño. Nuevamente, se requiere la correlación entre los resultados de estas pruebas con las probetas cúbicas/cilíndricas de tamaño estándar, ya que los valores presentados en los códigos como resistencia a la compresión se refieren a los tamaños de probetas cúbicas/cilindros estándar.

Con base en los resultados de investigaciones experimentales realizadas por varios investigadores sobre la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas y cúbicas de varios tamaños, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- El efecto del tamaño no es constante para ninguna geometría de muestra. El efecto del tamaño es más pronunciado en las probetas cúbicas que en las cilíndricas. Se encontró que la desviación estándar de la resistencia disminuía a medida que aumentaba el diámetro. Se observó que la resistencia en

las probetas cilíndricas se acercaba a un valor constante más allá de 600 mm (27.5 pulgadas);

- La relación de resistencia es más sensible a  $h/d$  para  $h/d < 1.5$  que para  $h/d > 1.5$ . La influencia de la esbeltez de la muestra disminuye significativamente al aumentar la resistencia a la compresión del concreto. Para CUAD, la relación de resistencia a la compresión entre el cilindro y el cubo es cercana a 1.0<sup>10</sup>. El tamaño máximo del agregado no influye en la relación de resistencia a la compresión para CUAD<sup>10</sup>. Cuando se mantiene constante la esbeltez, la resistencia a la compresión de CRN, CAR y CUAD solo cambia marginalmente para diferentes tamaños de probetas;
- No existe una relación definida entre las resistencias a la compresión de varias formas de probetas; sólo existen conversiones empíricas. Al utilizar dichos factores de conversión, se deben considerar varios parámetros (incluido el nivel de resistencia, el tipo de concreto, el tamaño/gradación del agregado, el recubrimiento, el material del molde, las condiciones de curado, los métodos de consolidación y la edad de la muestra) que afectan estas conversiones para elegir el factor más adecuado<sup>11</sup>;
- Los cilindros con diámetros de 100 mm y 76 mm y los cubos con lados de 100 mm son especímenes de prueba aceptables e intercambiables para la determinación de la resistencia a la compresión de CUADRF<sup>10</sup>; y
- El efecto del tamaño en CAR aún no se comprende completamente. Existe un debate sobre si el efecto del tamaño es más pronunciado en concreto de menor o mayor resistencia<sup>11</sup>.

## Referencias

1. EN 206:2013, "Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity," European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2013, 98 pp.
2. Bonzel, J., "Zur Gestaltsabhängigkeit der Betondruckfestigkeit," Beton- und Stahlbetonbau, V. 54, No. 9 and 10, 1959, pp. 223-228 and pp. 247-248, respectively.
3. Gonnerman, H.F., "Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete," ASTM Proceedings, V. 25, Part 2, 1925, pp. 237-250.

4. Nasser, K.W., and Al-Manaseer, A.A., "It's Time for a Change from 6 x 12- to 3 x 6-in. Cylinders," *ACI Materials Journal*, V. 84, No. 3, May-June 1987, pp. 213-216.
5. Nasser, K.W., and Kenyon, J.C., "Why Not 3 x 6 Inch Cylinders for Testing Concrete Compressive Strength?" *ACI Materials Journal*, V.81, No. 1, Jan.-Feb. 1984, pp. 47-53.
6. Day, R. "Strength Measurement of Concrete Using Different Cylinder Sizes: A Statistical Analysis," *Cement, Concrete, and Aggregates*, V. 16, No. 1, June 1994, pp. 21-30.
7. Issa, S.A.; Islam, M.S.; Issa, M.A.; and Yousif, A.A., "Specimen and Aggregate Size Effect on Concrete Compressive Strength," *Cement, Concrete, and Aggregates*, V. 22, No. 2, Dec. 2000, pp. 103-115.
8. Aïtcin, P.-C.; Miao, B.; Cook, W.D.; and Mitchell, D., "Effects of Size and Curing on Cylinder Compressive Strength of Normal and High Strength Concretes," *ACI Materials Journal*, V. 91, No. 4, July-Aug. 1994, pp. 349-354.
9. Mansur, M.A., and Islam, M.M., "Interpretation of Concrete Strength for Nonstandard Specimens," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 14, No. 2, Mar.-Apr. 2002, pp. 151-155.
10. Graybeal, B., and Davis, M., "Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 105, No. 6, Nov.-Dec. 2008, pp. 603-609.
11. Talaat, A.; Emad, A.; Tarek, A.; Masbouba, M.; Essam, A.; and Kohail, M., "Factors Affecting the Results of Concrete Compression Testing: A Review," *Ain Shams Engineering Journal*, V. 12, No. 1, Mar. 2021, pp. 205-221.
12. Elwell, D.J., and Fu, G., "Compression Testing of Concrete: Cylinders vs. Cubes," Report FHWA/NY/SR-45/119, Transportation Research and Development Bureau, New York State Department of Transportation, Albany, NY, Mar. 1995, 22 pp.
13. Neville, A.M., "A General Relation for Strengths of Concrete Specimens of Different Shapes and Sizes," *ACI Journal, Proceedings*, V. 63, No.10, Oct. 1966, pp. 1095-1110.
14. EN 1992-1-1:2004/AC: 2010, "Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings," European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2010, 225 pp.
15. Pacheco, J.; de Brito, J.; Chastre, C.; and Evangelista, L., "Probabilistic Conversion of the Compressive Strength of Cubes to Cylinders of Natural and Recycled Aggregate Concrete Specimens," *Materials*, V. 12, No. 2, Jan. 2019, pp. 280-291.
16. "Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes—Interim Recommendations," Association Française de Génie Civil (AFGC), Paris, France, 2002, 152 pp.
17. "Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures," Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 2004, 167 pp.
18. IS 1199 (Part 5) : 2018, "Fresh Concrete—Methods of Sampling, Testing and Analysis, Part 5 Making and Curing of Test Specimens," First revision, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 2018, 12 pp.
19. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-19) and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 624 pp.
20. Carino, N.J.; Guthrie, W.F.; Lagergren, E.S.; and Mullings, G.M., "Effects of Testing Variables on the Strength of High-Strength (90 MPa) Concrete Cylinders," *High-Performance Concrete – Proceedings, International Conference, Singapore, 1994, SP-149*, V.M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1994, pp. 589-632.
21. IS 516 - 1959, "Methods of Tests for Strength of Concrete," Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 1959, 25 pp.
22. "Concrete Manual," U.S. Bureau of Reclamation, Washington, DC, 1975, pp. 574-575.
23. Walz, K., *Gestaltfestigkeit von Betonkörpern*, German Committee for Structural Concrete (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb), No. 122, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 1957.
24. Riedel, P., and Leutbecher, T., "Effect of Specimen Size on the Compressive Strength of Ultra-High Performance Concrete," AFGC-ACI-fib-RILEM International. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2017, Montpellier, France, Oct. 2-4, 2017, pp. 251-260.
25. Malaikah, M.A.S., "Effect of Specimen Size and Shape on the Compressive Strength of High Strength Concrete," *Pertanika Journal of Science and Technology*, V. 13, No. 1, 2005, pp. 87-96.
26. ASTM C192/C192M-19, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 8 pp.
27. BS 1881: Part 108: 1983, "Testing Concrete, Part 108: Method for Making Test Cubes from Fresh Concrete," British Standard Institution, United Kingdom, 1983, 10 pp.
28. Turkel, A., and Ozkul, M.H., "Size and Wall Effects on Compressive Strength of Concretes," *ACI Materials Journal*, V. 107, No. 4, July-Aug. 2010, pp. 372-379.

29. Carpinteri, A.; Ferro, G.; and Monetto, I., "Scale Effects in Uniaxially Compressed Concrete Specimens," Magazine of Concrete Research, V. 51, No. 3, June 1999, pp. 217-225.
30. Bažant, Z.P., and Planas, J., Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, first edition, CRC Press, 1998, 640 pp.
31. Kim, J.-K., and Yi, S.-T., "Application of Size Effect to Compressive Strength of Concrete Members," Sādhanā, V. 27, Part 4, Aug. 2002, pp. 467-484.

Seleccionado por los editores para interés del lector.



**Subramanian Narayanan**, miembro ACI, es un consultor que actualmente vive en Maryland, EE. UU. Es el ex director ejecutivo de Computer Design Consultants en India. Tiene 45 años de experiencia profesional, que incluye consultoría, investigación y docencia en la India y en el extranjero. Narayanan es autor de 25 libros y 300 artículos técnicos y fue vicepresidente del Indian Concrete Institute y de la Association of Consulting Civil Engineers India. También ha sido miembro del consejo editorial y de los comités de revisión de varias revistas indias e internacionales. Recibió su doctorado en el Instituto Indio de Tecnología de Madrás, Chennai, India.

**La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de República Dominicana**

*Título: Efecto del tamaño y forma de la probeta en la resistencia a la compresión del concreto*



*Traductor:*  
**Dr. Fray F. Pozo-Lora**



*Revisor Técnico:*  
**Ing. Piero Caputo**