

Control de la resistencia a compresión del concreto: análisis comparativo entre los procedimientos propuestos de por la ABNT, ACI y EN. Estudio de caso

R. Boni¹ , C. Brites¹ , P. Helene^{1*} 

*Autor de Contacto: paulo.helene@concretophd.com.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.303>

Recepción: 16/03/2018 | Aceptación: 19/07/2018 | Publicación: 31/08/2018

RESUMEN

Se presentan resultados del control de resistencia a compresión del concreto con la normalización brasileña, así como comparaciones con los controles propuestos por ACI 318-14 y EN 206. En Brasil, el control de resistencia a compresión del concreto es conforme la ABNT NBR 12655: 2015. Sin embargo, cuando este control se realiza bajo otras normas, los resultados finales no coinciden, debido a que el procedimiento de muestreo y los criterios de aceptación son distintos. Para este artículo se realizó un estudio de caso real, donde se empleó una dosificación de concreto con $f_{ck}=40\text{MPa}$, auto consolidable, producido durante 2 años y 9 meses y aplicado en la estructura de un emprendimiento en la ciudad de São Paulo.

Palabras clave: control de la resistencia del concreto; variabilidad de la resistencia a la compresión del hormigón; comparación normas ABNT NBR 12655: 2015 con ACI 318-14 y EN 206.

Citar como: R. Boni, C. Brites, P. Helene (2018), “Control de la resistencia a compresión del concreto: análisis comparativo entre los procedimientos propuestos de por la ABNT, ACI y EN. Estudio de caso.”, Revista ALCONPAT, 8 (3), pp. 333-346, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.303>

¹ Universidade de Sao Paulo y PhD Engenharia, Brasil.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2019.

Concrete strength control: ABNT, ACI and EN comparative procedures. Site study case

ABSTRACT

This paper presents an approach regarding the control of compressive strength of concrete performed by Brazilian standard, additionally was proceeded with an analysis, from the same data, performed by ACI 318-14 and EN 206. In Brazil, the control of the axial compressive strength of concrete is proceed following ABNT NBR 12655:2015. However, when this control is proceeded by other standards criteria, the results are not coincident. The ACI 318 procedures of sampling and the acceptance criteria are different from the model adopted by Brazilian standard. For this paper, a real case study was carried out, where a $f_{ck}=40\text{MPa}$, (SCC) has been produced, during 2 years and 9 months and poured on the building structure located in the city of São Paulo.

Keywords: strength control of concrete; variability of concrete compressive strength; comparison standard ABNT NBR 12655 with ACI 318 and EN 206.

Controle da resistência à compressão do concreto: análise comparativa entre os procedimentos propostos pela ABNT, ACI e EN. Estudo de Caso

RESUMO

Neste artigo estão apresentados os resultados obtidos no controle de resistência à compressão do concreto realizado conforme normalização brasileira, bem como análises comparativas com os controles propostos pelo ACI 318-14 e EN 206. No Brasil, atualmente, o controle da resistência à compressão do concreto é realizado conforme a ABNT NBR 12655:2015. Entretanto, quando este controle é realizado à luz de outras normas, os resultados obtidos não coincidem, devido ao fato dos procedimentos de amostragem e critérios de aceitação serem distintos. Este artigo apresenta um estudo de caso real, onde foi empregado um traço de concreto $f_{ck} = 40\text{MPa}$, autoadensável, produzido durante 2 anos e 9 meses e aplicado na estrutura de um empreendimento localizado na cidade de São Paulo.

Palavras-chave: controle da resistência do concreto; variabilidade da resistência à compressão do concreto; comparação normas ABNT NBR 12655:2015 com ACI 318-14 e EN 206.

1. INTRODUCCIÓN

En Brasil, actualmente, el control de la resistencia a la compresión del concreto es realizado de acuerdo con las prescripciones de la norma ABNT NBR 12655: 2015 "Concreto de cemento Portland - Preparación, control, recepción y aceptación - Procedimiento" que presenta, en el subíndice 6.2 " "Ensayos de resistencia a la compresión", los límites máximos para la formación de lotes de concreto, criterios de muestreo y los dos tipos de control tecnológico considerados: control estadístico por muestreo parcial y control por muestreo total a 100%.

En el control por muestreo parcial las muestras se recolectan aleatoriamente de hormigonadas distintas, respetando la cantidad mínima de ejemplares (según los grupos y clases de resistencia del concreto) para posterior determinación del $f_{ck,est}$ por medio de expresiones matemáticas (con base estadística) denominadas estimadores . Estas expresiones tienen en cuenta, en el caso de muestras con un número de ejemplares comprendidos entre $6 \leq n < 20$, los menores resultados obtenidos y, para muestras con veinte o más ejemplares ($n \geq 20$), la resistencia media (f_{cm}) y la desviación estándar de producción y ensayo efectivo, denominado en la norma como s_d .

Además, en el control por muestreo parcial, el valor de $f_{ck,est}$ obtenido debe ser comparado con los valores mínimos admitidos (determinados en función de la condición de preparación del concreto y del número de ejemplares). Se consideran también algunos casos excepcionales: concretos producidos por betonadas de pequeño volumen y muestras compuestas por número de ejemplares comprendidos entre $2 \leq n \leq 5$.

Se destaca que, en Brasil, el control por muestreo parcial es comúnmente empleado en fábricas de pre-moldeados de concreto (losas alveolares, vigas, comlunas, etc.), debido principalmente a la dinámica de producción, repetibilidad de las piezas y al elevado número de hormigonadas, siendo menos susceptible su empleo en obras de arte o de edificaciones, construidas por hormigón *in loco*. En cuanto al control por muestreo total (100%), todas las hormigonadas son muestreadas y la resistencia característica a la compresión del concreto estimado ($f_{ck,est}$) es dada por el valor de la resistencia a la compresión del ejemplar de cada hormigón, una vez que la muestra, en este caso del 100%, se confunde con la población. Se trata de un control ampliamente utilizado en Brasil en obras de edificios comerciales y residenciales de múltiples pavimentos desde la vigencia de la ABNT NB-1 de 1978.

Conforme a lo establecido en el subíndice 6.2.2 "Muestreo" de la norma ABNT NBR 12655: 2015, cada ejemplar debe estar constituido por dos probetas de la misma amasada y moldeados en el mismo acto. La resistencia del ejemplar, para una determinada edad de ruptura, es la más alta entre los dos valores obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión.

El control de la resistencia a la compresión del hormigón de las estructuras de edificación y de obras de arte es parte integrante de la introducción de la seguridad en el proyecto estructural siendo indispensable su permanente comprobación a lo largo de la ejecución de la estructura (Pacheco & Helene, 2013a), así como su consistencia mediante la adecuada asignación del lanzamiento del hormigón.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos durante el control de resistencia a la compresión del concreto realizado por muestreo total a la luz de la ABNT NBR 12655, así como análisis comparativos con el control propuesto por la norma americana ACI 318-14 "*Building Code Requirements for Structural Concrete*" y la norma europea EN-206: 2013 "*Concrete - Specification, performance, production and conformidad*". Para ello, se analizó una composición de concreto $f_{ck} = 40\text{MPa}$, autoadensable con clase de dispersión SF 2 (slump-flow de 660mm a 750mm), conforme clasificación de la ABNT NBR 15823: 2010 "*Concreto auto-adensável. Parte 1: Clasificación, control y aceptación en el estado fresco*", producido en una sola central dosificadora durante un período de 2 años y 9 meses y aplicado en las estructuras de hormigón armado de 1 (una) torre comercial y 2 (dos) torres corporativas, con 24 a 36 pisos, de un emprendimiento ubicado en la ciudad de São Paulo.

2. ANTECEDENTES

2.1 Características del hormigón y particularidades de la producción

Con base en las directrices del método de dosificación IBRACON (Tutikian & Helene, 2011), en las especificaciones de proyecto, insumos disponibles, condiciones y particularidades del sitio de obras del emprendimiento se realizó un extenso estudio de dosificación racional y experimental para la elaboración de un concreto autoadensable con $f_{ck} = 40\text{MPa}$. Este estudio fue desarrollado de acuerdo con las normas ABNT NBR 12655 y ABNT NBR 15823.

Considerando todos los aspectos mencionados, se obtuvo la dosificación detallada en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición del concreto $f_{ck} = 40\text{MPa}$, en masa, materiales secos, para 1m^3 de hormigón.

| Insumos | $f_{ck} 40\text{MPa}$ |
|--|-----------------------|
| cemento (CP III-40-RS) | 380kg |
| Microsílice | 20kg |
| Agua | 180kg |
| arena fina natural | 364kg |
| arena artificial | 546kg |
| piedra 0 (dimensiones de 4,5mm a 9,5mm) | 279kg |
| piedra 1 (dimensiones de 9,5mm a 19mm) | 651kg |
| aditivo plastificante, 0,6% en masa de cemento | 2,3kg |
| aditivo superplastificante, 1,2% en masa de cemento | 4,6kg |
| masa específica del concreto fresco (kg/m^3) | 2420 |
| Slumpflow | SF2 |
| contenido de aire atrapado (%) | 0,8 |

Precedente al empleo del concreto, se realizó un evento prototipo para evaluar el comportamiento del hormigón estudiado en laboratorio, en las condiciones de obra. En la oportunidad, se observó en campo que la cantidad de aditivo superplastificante podría reducirse en hasta un 30%, en virtud de la mayor energía de mezcla del camión hormigonera y de las condiciones climáticas favorables. La Fig. 1 presenta el aspecto visual del concreto en cuestión, en su estado fresco, observado durante la ejecución del ensayo de dispersión para determinación de la fluidez (*slumpflow test*), realizado durante el evento de hormigón prototipo.



Figura 1. Aspecto visual del concreto autocompactante observado durante el ensayo de dispersión (*slumpflow test*).

En vista de los resultados satisfactorios obtenidos para el concreto tanto en el laboratorio como en el evento prototipo en campo, esa composición de concreto fue adoptado para la producción regular, siendo adecuado y mantenido constante durante todo el período de casi 3 años, considerado en este estudio.

La producción del concreto fue realizada en Central dosificadora estacionaria provista de sistema de carga automatizada, punto de carga cubiertos, balanzas e hidrómetros aferidos mensualmente

con disponibilidad de seis camiones hormigonera. La central dosificadora estacionaria de hormigón se ubicaba en el interior del sitio de obras y produjo concreto único y exclusivamente para el emprendimiento en cuestión, con capacidad de producción de hasta $70\text{m}^3/\text{h}$.

En cuanto a los procedimientos de carga, las britas o piedras, arenas, cemento, agua y aditivo plastificante se añadían en el punto de carga de la central y la microsílíce se colocaba en la cinta transportadora directamente sobre los agregados para asegurar una mejor homogeneización de la mezcla final, en el globo del camión hormigonera.

La humedad de los agregados se determinó 3 veces al día al menos a través del uso de la botella de Chapman (ABNT NBR 9775: 2011 "*Agregado Miudo - Determinación del contenido de humedad superficial por medio del frasco de Chapman - Método de ensayo*"). La humedad obtenida era lanzada en el software del sistema de balanza de la Central dosificadora que efectuaba automáticamente las correcciones necesarias.

Después de la carga del concreto se añadía, el aditivo superplastificante. Esta adición era procedida en volumen, por profesional entrenado por medio de la utilización de baldes graduados. En algunas oportunidades, hubo el empleo de 100% de hielo en sustitución del agua de amasamiento (caso de concretos de elementos de fundación de grandes volúmenes). Tanto en la adición de hielo, como de aditivo superplastificante y microsílíce había el control de las cantidades agregadas, mediante acompañamiento de profesionales extras contratados junto al Laboratorio responsable por el control de la resistencia a la compresión del concreto (control de las bolsas de hielo, de microsílíce y verificación del volumen de aditivo).

Importante registrar que, una vez fuera de la Central dosificadora, no era permitido añadir agua al hormigón, en hipótesis alguna. En caso de necesidad de corrección del slumpflow, se empleaba el aditivo superplastificante (añadido, eventualmente, en cantero de obras por profesional entrenado después de autorización del responsable y sólo para corrección de la fluidez del concreto fresco).

En este contexto, el concreto fue suministrado siempre con la misma composición o dosificación, por la misma central dosificadora durante un período de 2 años y 9 meses. En total, se generaron, aproximadamente 1.600 camiones hormigonera con 8m^3 cada uno, totalizando cerca de 12.000m^3 de concreto, es decir, en promedio $360\text{m}^3/\text{mes}$.

2.2 Plan de control de la resistencia

El control de resistencia a la compresión del concreto fue realizado por muestreo total respetando las prescripciones de la norma ABNT NBR 12655 por Laboratorio acreditado por el INMETRO perteneciente a la Red Brasileña de Laboratorio de Ensayos, que utilizó laboratoristas calificados y certificados por el IBRACON a través de su Núcleo de Calificación y Certificación de Personal. El plan de control de la resistencia del concreto adoptado durante todo el proceso de producción consistía en el moldeo de 4 (cuatro) probetas cilíndricas con diámetro de 10 cm y altura de 20 cm de cada uno de los camiones hormigonera siendo, 1 (uno) para ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días, 2 (dos) a 28 días y 1 (uno) a 63 días de edad.

Las probetas fueron moldeadas en moldes metálicos en un piso plano, protegido de las intemperies y posteriormente (después de un desmoldeo entre 24 y 36 h), transportados en cajas de arena seca hasta la central del Laboratorio de control tecnológico ubicado a una distancia de aproximadamente 15 km del sitio de la obra, para sazonomiento y ensayo. Estos fueron almacenados en cámara húmeda, tuvieron sus topes preparados por medio de rectificación y fueron ensayados en prensas calibradas periódicamente, de conformidad con las normas ABNT NBR 5738: 2015 "*Concreto - Procedimiento para moldeo y curación de probetas*" y ABNT NBR 5739 : 2007 "*Concreto - Ensayo de compresión de probetas cilíndricas*".

3. RESULTADOS

3.1 Presentación de los resultados de resistencia a la compresión a la luz de la ABNT

La resistencia a la compresión de cada uno de los ejemplares fue determinada después de la ruptura de las probetas, conforme las prescripciones de la norma ABNT NBR 5739.

En la Fig. 2 se presenta la carta de valores individuales de las resistencias a la compresión del hormigón a los 28 días de edad, el histograma y la distribución normal correspondiente. En esta carta, el eje de las abscisas presenta los ejemplares en orden cronológico y, el eje de las ordenadas, los valores de resistencia a la compresión de los ejemplares.

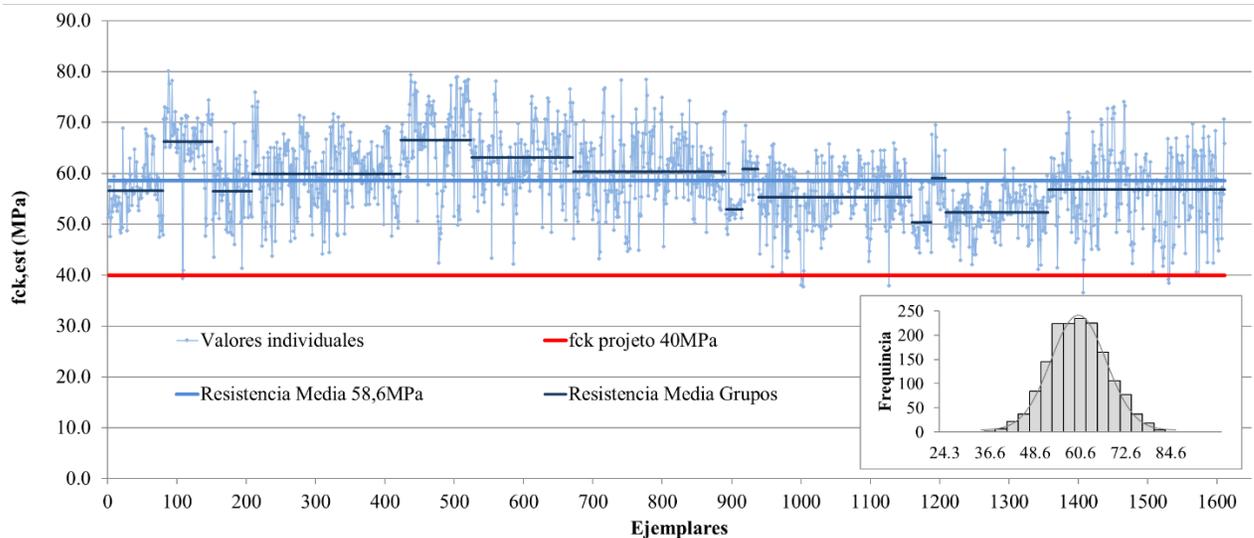


Figura 2. Carta de valores individuales con base en los resultados de resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días de edad e histograma correspondiente.

La carta presenta alrededor de 1600 resultados de resistencia a la compresión, obtenidos a lo largo de 2 años y 9 meses. Estos resultados variaron de 36,6 MPa a 80,1 MPa, con un promedio de 58,6 MPa, siendo el menor valor obtenido equivalente a $0,91 * f_{ck}$. Se constataron 11 (once) resultados por debajo de la resistencia especificada en proyecto ($f_{ck} = 40\text{MPa}$), es decir, cerca del 0,7% del total de camiones. En una distribución normal (curva de Gauss) el cuantil de defectos correspondería a un coeficiente de 2,46 en lugar de los 1,645 del cuantil 5%.

La variabilidad de la resistencia a la compresión de un mismo concreto puede oscilar en torno a diferentes valores, pues en el transcurso del proceso productivo ocurren cambios de centrado, principalmente debido a diferentes partidas de cemento y agregados.

El valor de la resistencia a la compresión de ese hormigón, obtenido directamente de la población, sería de f_{ck} , debido al concepto de resistencia característica del concreto descrito en el subíndice 12.2 "Valores característicos" de la norma ABNT NBR 6118: 2014 "Proyecto de estructuras de concreto - Procedimiento", el valor de la resistencia a la compresión de ese concreto, obtenido directamente de la población, sería de $f_{ck,5\%} = 46,5\text{MPa}$. La desviación estándar de las operaciones de producción y ensayo obtenido fue $s_c = 6,6\text{MPa}$ y el coeficiente de variación $V_c = 11,2\%$.

Aún, la resistencia característica de este concreto adaptada del criterio de muestreo parcial de la ABNT NBR 12655, sería de $f_{ck,est} = f_{cm} - 1,65 * s_c = 47,7\text{MPa}$, aunque, en este caso, se trata sólo de una especulación matemática, pues el criterio efectivo a ser utilizado debe ser el de muestreo total al 100%.

3.2 Evaluación del control del proceso de producción

De acuerdo con el ítem 7 "Análisis del proceso" de la ABNT NBR 7212: 2012 "Ejecución de concreto dosificado en central - Procedimiento" la evaluación del control del proceso debe ser realizada con base en la desviación estándar, conforme presentado en la Tabla 2.

Tabla 2. Desviación estándar del proceso, ABNT NBR 7212: 2012.

| Lugar de producción | Desviación estándar (MPa) | | | |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 | Nivel 4 |
| Planta estacionaria de hormigón | $s < 3,0$ | $3,0 < s < 4,0$ | $4,0 < s < 5,0$ | $s > 5,0$ |

De esta forma, por medio del análisis de la desviación estándar y de los criterios preconizados por la ABNT NBR 7212: 2012, se trata de una Central Nivel 4.

De acuerdo con los parámetros establecidos actualmente por la ABNT NBR 12655, esta desviación estándar de la producción es elevada y no compatible con la producción de hormigón en planta, clase A. Por otro lado, la norma ABNT NB-1 de 1960, consideraba que la producción de concreto con desviación estándar igual o inferior al 15% debía ser clasificada como producción rigurosa, o sea, correspondería a la mejor clasificación en la época.

El coeficiente de variación (V_c) es el parámetro que debe utilizarse para calificar o clasificar el rigor de producción del hormigón, de acuerdo con el ACI 214, para el cálculo de las normas de control, para concretos de $f_{ck} \geq 35\text{MPa}$ (caso en cuestión) presentado en la Tabla 3, y en ese caso la producción puede ser clasificada con rigor bueno/razonable.

Tabla 3. Coeficiente de variación de las operaciones de producción y ensayo (V_c), ACI 214.

| Producción | Coeficiente de variación | | | | |
|--------------------------------|--------------------------|-------------|--------------|---------------|------------|
| | Excelente | Muy bien | Bueno | Razonable | Deficiente |
| Control en obra | $< 7,0\%$ | 7,0% a 9,0% | 9,0% a 11,0% | 11,0% a 14,0% | $> 14,0\%$ |
| Investigaciones en laboratorio | $< 3,5\%$ | 3,5% a 4,5% | 4,5% a 5,0% | 5,0% a 7,0% | $> 7,0\%$ |

3.3 Influencia de las operaciones de ensayo y control

Los resultados de resistencia a la compresión a los 28 días de edad disponibles fueron analizados, desde el punto de vista de la influencia de las operaciones de ensayo y control, de acuerdo con los criterios recomendados por el American Concrete Institute en el ACI-214R-11 "Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete".

Esta metodología consiste en el cálculo de la desviación estándar y del coeficiente de variación debido a las operaciones de ensayo y control, teniendo como base el resultado de resistencia a la compresión de probetas hermanas y posterior comparación con los criterios de control sugeridos en el Capítulo 4 "Strength Data" que establece lo siguiente:

a) Cálculo de la desviación estándar de las operaciones de ensayo y control:

$$se = \frac{\sum_{i=1}^n Ai}{n.d2} \quad \text{(ecuación 3.1)}$$

donde:

s_e : desviación estándar de las operaciones de ensayo en MPa;

n : número de ejemplares considerados compuestos de p probetas (nunca inferior a 10 ejemplares);

A : diferencia entre el mayor y el menor resultado de las dos probetas que representan un mismo ejemplar;

d_2 : coeficiente que depende del número p de probetas representativas de un mismo ejemplar, conforme Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes d_2 para el cálculo de la desviación estándar de las operaciones de ensayo y control.

| Número p de ejemplares | d_2 |
|--------------------------|-------|
| 2 | 1,128 |
| 3 | 1,693 |
| 4 | 2,059 |

b) Cálculo del coeficiente de variación o variabilidad de las operaciones de ensayo y control:

$$V_e = \left(\frac{s_e}{f_{cmj}} \right) \cdot 100 \quad \text{(ecuación 3.2)}$$

donde:

s_e : desviación estándar de las operaciones de ensayo en MPa (valor obtenido en el ítem a)

V_e : coeficiente de variación debido a las operaciones de ensayo y control (%);

f_{cmj} : media de todos los resultados utilizados, a los j edades de edad, en MPa.

c) Determinación del Estándar de Control, conforme Tabla 5:

Tabla 5. Coeficiente de variación de las operaciones de ensayo y control (V_e), ACI 214.

| Producción | Coeficiente de variación | | | | |
|--------------------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| | Excelente | Muy bien | Bueno | Razonable | Deficiente |
| Control en obra | < 3,0% | 3,0% a 4,0% | 4,0% a 5,0% | 5,0% a 6,0% | > 6,0% |
| Investigaciones en laboratorio | < 2,0% | 2,0% a 3,0% | 3,0% a 4,0% | 4,0% a 5,0% | > 5,0% |

Considerando la diferencia de resistencia a la compresión entre las 2(dos) probetas hermanas rotas a los 28 días de edad, los resultados obtenidos a lo largo de todo el período de producción del concreto indicaron desviación estándar de las operaciones de ensayo y control (s_e) de 0,6MPa a 1,0MPa y coeficiente de variación debido a las operaciones de ensayo y control (V_e) entre el 1,1% al 1,6%.

Siendo así, conforme a los límites preconizados por el ACI 214, todos los resultados apuntan a un patrón de control de las operaciones de ensayo, en obra, excelente. Se observa, por otro lado, que los resultados obtenidos son más rigurosos que los ensayos realizados en investigaciones experimentales conducidas en laboratorio, lo que no es común.

3.4 Análisis comparativo entre los métodos de control propuestos por ABNT y ACI

Conforme a lo detallado anteriormente, el control de la resistencia a la compresión del concreto fue realizado por muestreo total de acuerdo con las prescripciones de la norma ABNT NBR 12655. Sin embargo, cuando los valores de resistencia a la compresión de esa misma producción de concreto se analizan a la luz del ACI 318, el juicio del proceso no coincide. Esto se explica debido al hecho de los procedimientos de muestreo, así como los criterios de aceptación prescritos por el ACI ser distintos del modelo adoptado por la ABNT.

En cuanto al muestreo, el ACI 318 en el ítem 26.12, recomienda como criterios mínimos

- ✓ un ejemplar por día de hormigonado;
- ✓ un ejemplar para cada 115 m³ de concreto producido;
- ✓ un ejemplar para cada 465 m² de área para losas o paredes;
- ✓ el control para volúmenes inferiores a 38m³ es dispensado, siempre que exista una declaración aprobada de la composición del concreto.

De acuerdo con el ACI 318, el valor de la resistencia a la compresión de cada uno de los ejemplares se determina por la media aritmética simple de los resultados obtenidos. Conforme a la ASTM C39-16b "*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*", si los valores individuales de las probetas hermanas difieren de más del 8%, los resultados son inadecuados y el ensayo debería repetirse. El ACI 318, así como la ABNT NBR 12655 y la norma europea EN-206:2013 "*Concrete - Specification, performance, production and conformidad*", también considera que de cada camión de hormigón se obtiene sólo 1 (un) valor de resistencia a la compresión.

El ACI 318 prescribe los siguientes criterios de aceptación y conformidad:

- ✓ para $f_{ck} \leq 35\text{MPa}$, ningún resultado individual debe ser inferior a $f_{ck} - 3,5\text{MPa}$;
- ✓ para $f_{ck} > 35\text{MPa}$, ningún resultado individual puede ser inferior a $0,9*f_{ck}$;
- ✓ el promedio móvil de cualquier 3(tres) resultados consecutivos debe ser igual o superior a la resistencia característica definida en el proyecto (f_{ck}).

De esta forma, a fin de realizar un análisis comparativo entre los controles efectuados por la ABNT y ACI, todos los valores de resistencia a la compresión obtenidos a los 28 días de edad también fueron tratados y organizados de acuerdo con los criterios de muestreo y aceptación propuestos por el ACI 318, como se muestra más adelante.

Considerando el criterio mínimo de muestreo propuesto por el ACI de un ejemplar a cada 115m³ de concreto (es decir, un moldeo de probetas a cada 14 camiones hormigonera de 8m³), se hizo posible analizar numerosas combinaciones de resultados, para todos los camiones hormigonera (población). Por lo tanto, para estudiar todas las posibilidades, se determinaron los envoltorios de los valores individuales y del promedio móvil de 3(tres) resultados consecutivos.

Conforme criterio preconizado por el ACI 318 todos los valores individuales deben ser mayores que 36MPa ($0,9*f_{ck}$). Se observa en la Fig. 3 (envoltorio de los valores individuales) que, frente a todas las posibilidades, ningún valor es menor que 36MPa (se subraya que el menor valor promedio individual registrado fue de 36,2MPa). Por lo tanto, este criterio de aceptación fue siempre atendido.

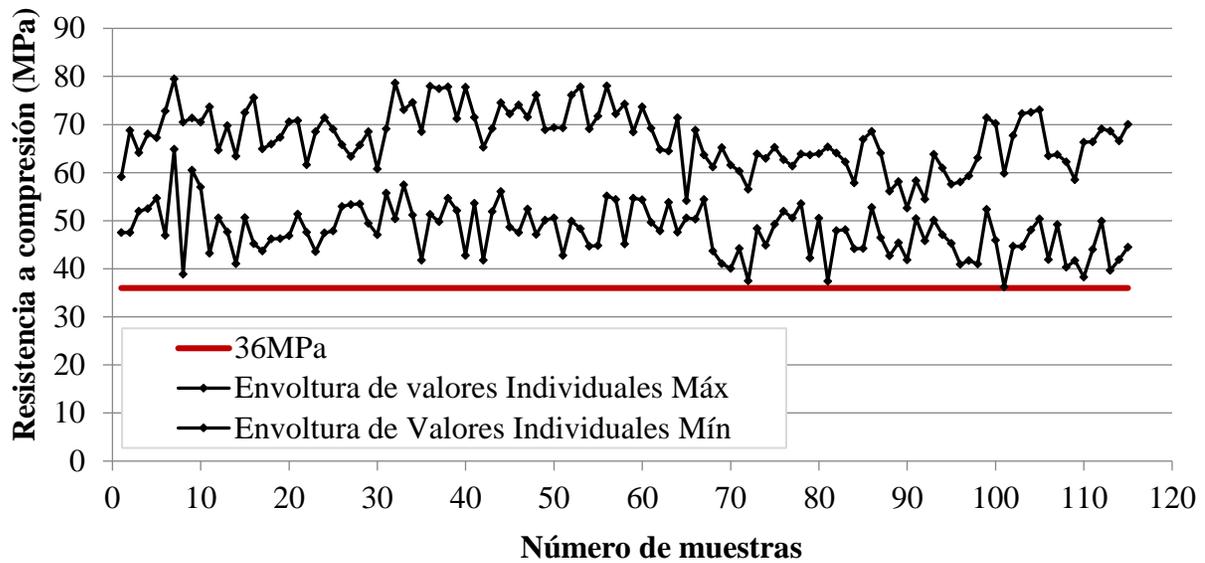


Figura 3. Envoltorio de resistencia a la compresión de los valores medios individuales de cada camión hormigonera.

Además, de acuerdo con el ACI, para garantizar la aceptación del concreto, se debe efectuar otro tipo de análisis. En la Fig. 4 se presenta el envoltorio del promedio móvil a lo largo de todo el período de producción. Se observa que en ningún caso el promedio móvil fue inferior a la resistencia característica definida en proyecto (40MPa). El menor valor registrado fue de 40,1MPa. Siendo así, sea cual fuere la combinación de resultados considerada, ese criterio de aceptación también fue siempre atendido.

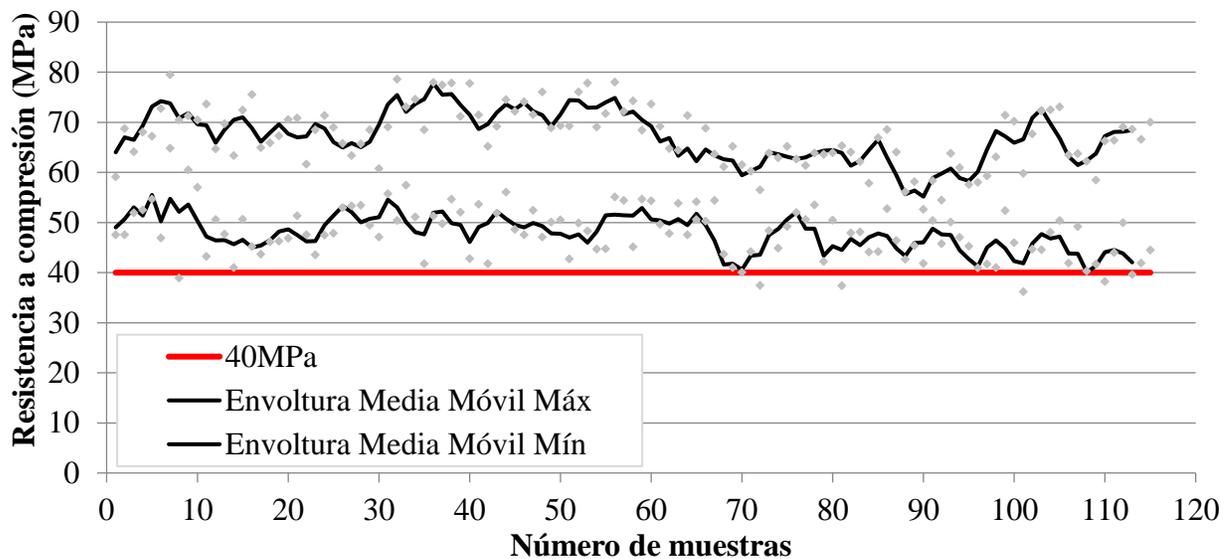


Figura 4. Envoltura del promedio móvil de 3 valores consecutivos a lo largo del período de producción.

Por lo tanto, considerando el escenario más desfavorable posible, si el control tecnológico del concreto fuera realizado a la luz del ACI 318 no existirían no conformidades una vez que ambos criterios (valores individuales y promedio móvil) siempre fueron atendidos simultáneamente.

3.5 Análisis comparativo entre los métodos de control propuestos por ABNT y EN

Así como la norma americana, la metodología europea EN 206 establece 2(dos) criterios para analizar la conformidad de la resistencia a la compresión del concreto: criterio para resultados individuales y criterio para resultados promedios. En el caso del análisis por criterio individual, cada resultado debe satisfacer la siguiente condición: todo y cualquier valor individual debe ser $\geq f_{ck} - 4\text{MPa}$.

En cuanto al criterio para resistencias promedias, la norma en cuestión permite que la resistencia a la compresión sea evaluada por uno de los siguientes métodos:

- ✓ método A o control de la producción inicial. En este caso, la resistencia promedio de 3(tres) resultados consecutivos debe ser $\geq f_{ck} + 4\text{MPa}$, siendo que los criterios de conformidad se desarrollaron sobre la base de resultados de ensayo no superpuestos. Por lo tanto, la aplicación de criterios de superposición de resultados (promedio móvil de resultados consecutivos) aumenta el riesgo de rechazo;
- ✓ método B o control de producción continua. Se trata de una opción cuando se establecen los criterios de producción continua, es decir, cuando al menos 35(treinta y cinco) resultados de ensayos están disponibles en un período de 3(tres) meses. De acuerdo con este método, el promedio de 15(quince) o más resultados consecutivos [puestos a disposición en un período no superior a 3 (tres) meses] debe ser $\geq f_{ck} + 1,48*\sigma$ (adoptando como σ la desviación estándar determinado al final del control de inicio de producción).

La EN 206 todavía permite que la conformidad de la resistencia a la compresión del concreto sea evaluada por el empleo de gráficos de control (método C), siempre que las condiciones de producción continua estén establecidas y que ésta sea certificada por terceros, lo que no es el caso de este estudio.

En cuanto a la formación de los lotes, cuando la producción continua se realiza en centrales de concreto con certificación de control de producción, las muestras deben ser retiradas cada 200 m³ (o una cada 3 días de producción). Si la producción de hormigón no tiene certificación de control de producción (como el caso en estudio), las muestras deben retirarse cada 150 m³ (o una por día de producción). Importante: en los primeros 50 m³ de producción deben retirarse 3(tres) muestras (probetas), como mínimo.

Es válido registrar que esta norma permite como resultado de un ejemplar el valor obtenido de una sola probeta o, en el caso de más rupturas, el resultado se define como el valor promedio. Los resultados individuales que se alejen más del 15% del valor del promedio deben ser desconsiderados.

Por lo tanto, análogo al caso discutido anteriormente (ACI), una vez que fueron moldeadas probetas para todos los camiones hormigonera (población), en el caso de la EN también fue posible efectuar un análisis considerando innumerables combinaciones de resultados.

De acuerdo con el criterio mínimo de muestreo propuesto por la EN de 3 (tres) ejemplares en los primeros 50 m³ de producción y, posteriormente, 1 (un) ejemplar cada 150 m³ de concreto (es decir, un moldeo de probetas a cada 18 camiones hormigonera de 8 m³), se obtuvo la envoltoria de valores individuales presentada en la Fig. 5.

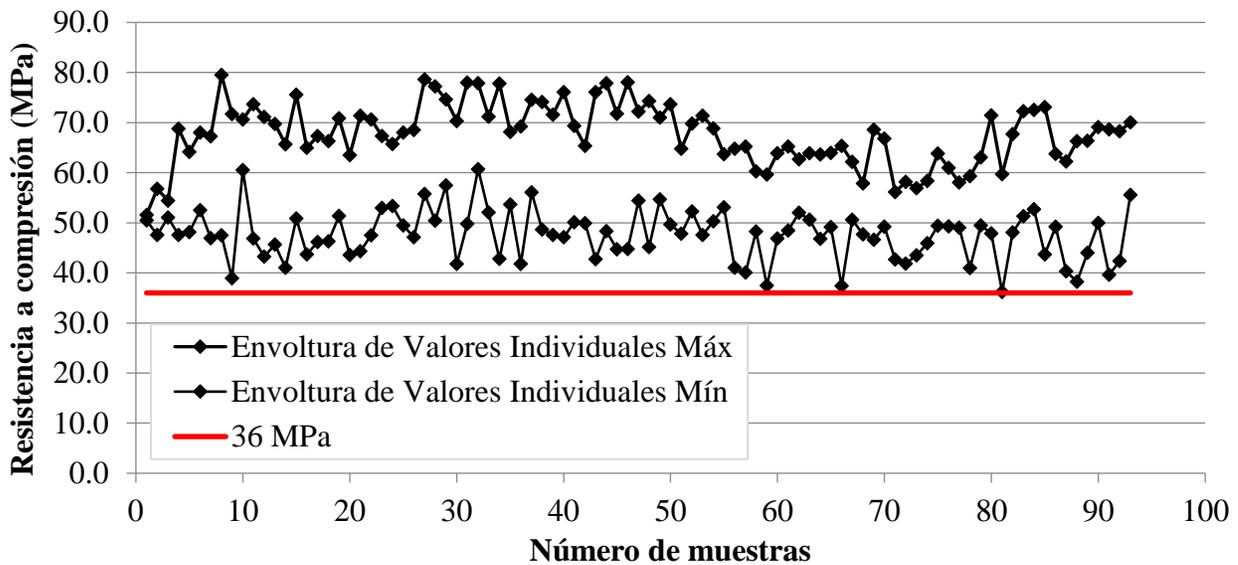


Figura 5. Involucramiento de resistencia a la compresión de los valores individuales.

Se observa que, durante el período de producción, el criterio de valores individuales preconizado en el subíndice 8.2.1.3.1 "Criteria for individual results" de la EN 206: 2013 fue atendido en todos los casos. De nuevo, vale recordar que el menor valor de resistencia a la compresión obtenido en ese período fue de 36,2 MPa, considerando el promedio entre 2(dos) probetas hermanas.

En cuanto al análisis de los resultados promedios, de forma a contemplar todas las posibilidades, se consideró la envoltura de los valores promedios de 3 (tres) resultados consecutivos no superpuestos, conforme evidenciado en la Fig. 6.

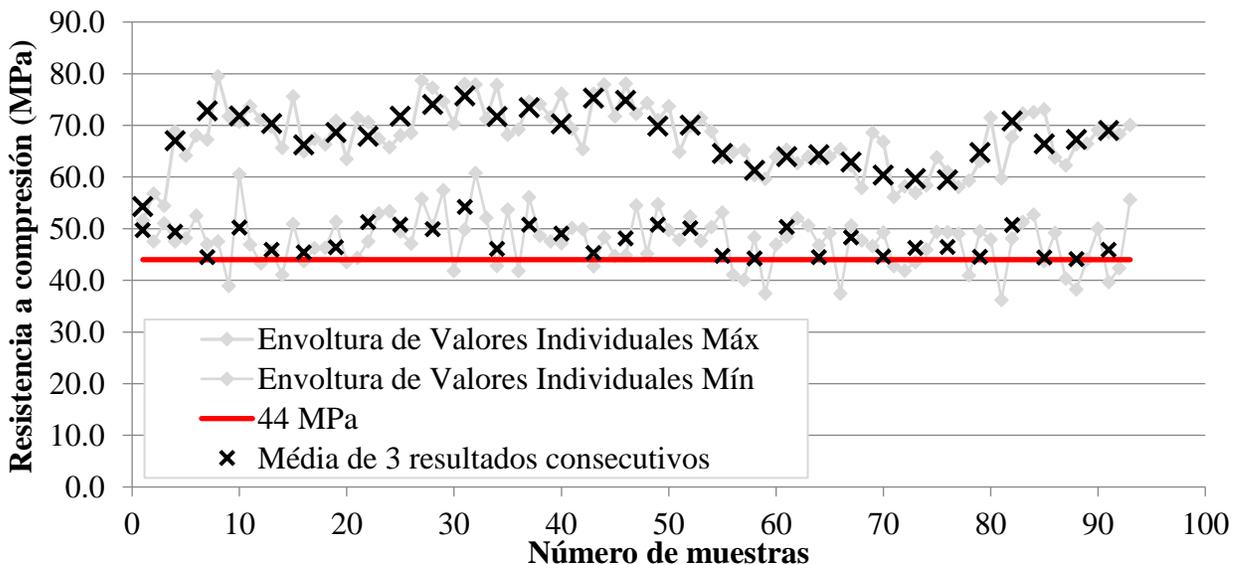


Figura 6. Envoltura del promedio de 3 (tres) valores consecutivos no superpuestos a lo largo del período de producción.

Igual que en el caso de la curva de valores individuales, la curva de valores promedios obtenida durante todo el período de producción siempre cumplió los requisitos establecidos en el subíndice 8.2.1.3.2 "Criteria for mean results" de la EN 206: 2013. En este caso, el menor valor obtenido fue de 44,1MPa, es decir, superior al criterio $\geq f_{ck} + 4MPa = 44MPa$.

Es importante señalar que los criterios de seguridad de las estructuras establecidos en la norma europea son distintos de los criterios adoptados por las normas americana y brasileña, pues

implican probabilidades de ruptura, valores característicos de las acciones y de las resistencias diferentes. Por lo tanto, es razonable esperar que los valores de resistencia a la compresión obtenidos en este caso sean un poco diferentes de los casos anteriores.

4. CONCLUSIONES

El control de resistencia a la compresión del concreto preconizado por la normalización brasileña es muy riguroso y el más seguro. El muestreo es total al 100% (población) y los resultados se analizan individualmente, sin tolerancias, es decir, cualquier valor de resistencia que sea inferior a la especificación de proyecto será considerado no conforme, por menor que sea la diferencia. Sin embargo, a pesar de ser muy seguro, se trata de un control oneroso, pues involucra el moldeo, manipulación, transporte, curado, rectificación y ruptura de muchas probetas del hormigón de todos los camiones hormigonera recibidos en obra (control por muestreo total).

Se observa que la metodología de control prescrita por el ACI 318 y EN 206 es mucho más blanda, cuando comparada a los criterios de la norma brasileña. En estas normas el control no se realiza por muestreo total, se establecen tolerancias para los valores individuales de resistencia a la compresión y, además, también se aplica el concepto del promedio de resultados consecutivos como criterio de aceptación.

En la opinión de los autores de este artículo los criterios de aceptación y conformidad preconizados por la ABNT NBR 12655 son exigentes y cabría flexibilizar el valor de resultados individuales dentro de un margen de hasta $0,9 * f_{ck}$. Por otro lado, el criterio de muestreo adoptado en Brasil se coloca a favor de la seguridad y en la opinión de estos autores, a pesar de ser oneroso, debe ser mantenido como está.

En este estudio de caso, los resultados obtenidos por medio del control tecnológico prescrito por la ABNT NBR 12655 apunta a un índice de no conformidad relacionado con la resistencia a la compresión del hormigón de 11 veces en aproximadamente 1.600 camiones hormigonera (0,7%). Esta no conformidad poco importante generó desgastes y revisiones de proyecto absolutamente innecesarias. En cambio, los mismos resultados, analizados a la luz de las metodologías prescritas por el ACI 318 y EN 206, indicaron un índice de no conformidad nulo.

La adopción de la flexibilización y aceptar algunos pocos valores individuales de hasta $0,9 * f_{ck}$ como conformes, ciertamente impactaría de manera positiva en el proceso de producción, minimizando posibles costos, retrabajos, revisiones de proyecto, retrasos en cronogramas de obra y desgastes innecesarios entre los actores de la cadena productiva del concreto, sin comprometimiento de la seguridad, durabilidad y calidad final de las estructuras de concreto.

5. REFERENCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), *NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 23.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 238.

American Concrete Institute (2011), *ACI 214R-11: Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete*, American Concrete Institute, p. 16.

American Concrete Institute (2014), *ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute, p. 524.

ASTM International. (2016). *ASTM C39/C39M-16b Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-16B

- EN 206 (2013), *Concrete – Specification, performance, production and conformity*, European Committee for Standardization, p. 93.
- Pacheco J. & Helene P. (2013), *Controle da resistência do concreto - 1ª Parte*, Revista Concreto e Construções n. 69, pp 75 - 81.
- Pacheco J. & Helene, P. (2013), *Controle da resistência do concreto - 2ª Parte*, Revista Concreto e Construções n. 70, pp 90 - 98.
- Tutikian B. & Helene P. (2011), *Dosagem dos Concretos de Cimento Portland*. In: Geraldo C. Isaia (Org). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1 ed. São Paulo: Ibracon, v. 1, pp 415 - 451.