

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

R. Boni¹, C. Britez¹, P. Helene^{1*} 

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

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

Recepção: 16/03/2018 | Aceitação: 19/07/2018 | Publicação: 31/08/2018

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

Citar como: R. Boni, C. Britez, P. Helene (2018), " *Controle da resistência à compressão do concreto: análise comparativa entre os procedimentos propostos pela ABNT, ACI e EN. Estudo de Caso.*", Revista ALCONPAT, 8 (3), pp. 333-346, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.303>

¹ Universidade de São Paulo y PhD Engenharia, Brasil.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo: No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 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.

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

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

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, atualmente, o controle da resistência à compressão do concreto é realizado de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR 12655:2015 “*Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento*” que apresenta, no subitem 6.2 “*Ensaio de resistência à compressão*”, os limites máximos para a formação de lotes de concreto, critérios de amostragem e os dois tipos de controle tecnológico considerados: controle estatístico por amostragem parcial e controle por amostragem total.

No *controle por amostragem parcial* as amostras são coletadas aleatoriamente de betonadas distintas, respeitando a quantidade mínima de exemplares (conforme os grupos e classes de resistência do concreto) para posterior determinação do $f_{ck,est}$ por meio de expressões matemáticas (com fundamento estatístico) denominadas estimadores. Estas expressões levam em conta, no caso de amostras com número de exemplares compreendidos entre $6 \leq n < 20$, os menores resultados obtidos e, para amostras com vinte ou mais exemplares ($n \geq 20$), a resistência média (f_{cm}) e o desvio padrão de produção e ensaio efetivo, denominado na norma como s_d .

Além disso, no controle por amostragem parcial, o valor de $f_{ck,est}$ obtido deve ser comparado com os valores mínimos admitidos (determinados em função da condição de preparo do concreto e do número de exemplares). Consideram-se ainda alguns casos excepcionais: concretos produzidos por betonadas de pequeno volume e amostras compostas por número de exemplares compreendidos entre $2 \leq n \leq 5$.

Ressalta-se que, no Brasil, o controle por amostragem parcial é comumente empregado em fábricas de pré-moldados de concreto (lajes alveolares, vigas, pilares, dormentes etc.), devido, principalmente, à dinâmica de produção, repetibilidade das peças e ao elevado número de betonadas envolvidas, sendo menos suscetível seu emprego em obras de arte ou de edificações, construídas por concretagem *in loco*.

Quanto ao *controle por amostragem total* (100%), todas as betonadas são amostradas e a resistência característica à compressão do concreto estimada ($f_{ck,est}$) é dada pelo valor da resistência à compressão do exemplar de cada betonada, uma vez que a amostra, neste caso de 100%, confunde-se com a população. Trata-se de um controle largamente utilizado no Brasil em obras de edifícios comerciais e residenciais de múltiplos pavimentos desde a vigência da ABNT NB-1 de 1978.

Conforme estabelecido no subitem 6.2.2 “*Amostragem*” da norma ABNT NBR 12655:2015, cada exemplar deve ser constituído por dois corpos de prova da mesma amassada e moldados no mesmo ato. A resistência do exemplar, para uma determinada idade de ruptura, é a maior dentre os dois valores obtidos no ensaio de resistência à compressão.

O controle da resistência à compressão do concreto das estruturas de edificação e de obras de arte é parte integrante da introdução da segurança no projeto estrutural sendo indispensável sua permanente comprovação ao longo da execução da estrutura (Pacheco & Helene, 2013^a), bem como a sua respectiva rastreabilidade por meio do adequado mapeamento do lançamento do concreto.

Neste trabalho estão apresentados os resultados obtidos durante o controle de resistência à compressão do concreto realizado por amostragem total à luz da ABNT NBR 12655, bem como análises comparativas com o controle proposto pela norma americana ACI 318-14 “*Building Code Requirements for Structural Concrete*” e pela norma europeia EN-206:2013 “*Concrete – Specification, performance, production and conformity*”. Para tanto, foi analisado um traço de concreto $f_{ck} = 40\text{MPa}$, autoadensável com classe de espalhamento *SF 2* (*slump-flow* de 660mm a 750mm), conforme classificação da ABNT NBR 15823:2010 “*Concreto auto-adensável. Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco*”, produzido em uma única Central dosadora durante um período de 2 anos e 9 meses e aplicado nas estruturas de concreto armado de 1 (uma) torre comercial e 2 (duas) corporativas, com 24 a 36 pavimentos, de um empreendimento de grande porte localizado na cidade de São Paulo.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO E PREMISAS

2.1 Características do concreto e particularidades da produção

Com base nas diretrizes do método de dosagem IBRACON (Tutikian & Helene, 2011), nas especificações de projeto, insumos disponíveis, condições e particularidades do canteiro de obras do empreendimento foi realizado um extenso estudo de dosagem racional e experimental para elaboração de um traço de concreto autoadensável com $f_{ck} = 40\text{MPa}$. Este estudo foi desenvolvido em conformidade com as normas ABNT NBR 12655 e ABNT NBR 15823.

Considerando todos os aspectos mencionados, obteve-se o traço detalhado na Tabela 1.

Tabela 1. Traço do concreto $f_{ck} = 40\text{MPa}$, em massa, materiais secos, para 1m^3 de concreto.

Insumos do traço do concreto	$f_{ck} 40\text{MPa}$
cimento (CP III-40-RS)	380kg
sílica ativa	20kg
água	180kg
areia fina natural	364kg
areia artificial, areia de brita	546kg
brita 0 (dimensões de 4,5mm a 9,5mm)	279kg
brita 1 (dimensões de 9,5mm a 19mm)	651kg
aditivo polifuncional, 0,6% em massa de cimento	2,3kg
aditivo superplastificante, 1,2% em massa de cimento	4,6kg
massa específica do concreto fresco (kg/m^3)	2420
espalhamento (classe)	SF2
teor de ar aprisionado (%)	0,8

Precedentemente ao emprego do traço, foi realizado um evento de concretagem protótipo para avaliar o comportamento do concreto estudado em laboratório, nas condições de obra. Na oportunidade, observou-se em campo que a quantidade de aditivo superplastificante poderia ser reduzida em até 30%, em virtude da maior energia de mistura do caminhão betoneira e das condições climáticas favoráveis. A Fig. 1 apresenta o aspecto visual do concreto em questão, em seu estado fresco, observado durante a execução do ensaio de espalhamento para determinação da fluidez (*slumpflow test*), realizado durante o evento de concretagem protótipo.



Figura 1. Aspecto visual do concreto autoadensável observado durante o ensaio de espalhamento (*slumpflow test*).

Tendo em vista os resultados satisfatórios obtidos para o traço tanto no laboratório quanto no evento protótipo em campo, esse traço foi adotado para a produção regular tendo sido adequado durante todo o período de quase 3 anos, considerado neste estudo.

A produção do concreto foi realizada em Central dosadora estacionária provida de sistema de carregamento automatizado, baias e ponto de carga cobertos, balanças e hidrômetros aferidos mensalmente (inclusive os hidrômetros localizados nos locais denominados redosadores) e disponibilidade de seis caminhões betoneira. A Central dosadora estacionária de concreto se

localizava no interior do canteiro de obras e produziu concreto única e exclusivamente para o empreendimento em questão, com capacidade de produção de até 70m³/hora. Quanto aos procedimentos de carga, as britas, areias, cimento, água e aditivo polifuncional eram adicionados no ponto de carga da Central e a sílica ativa era colocada na esteira rolante diretamente sobre os agregados visando assegurar melhor homogeneização da mistura final, que era realizada no balão do caminhão betoneira. A umidade dos agregados miúdos era determinada 3 vezes ao dia, no mínimo, através da utilização do frasco de Chapman (ABNT NBR 9775:2011 “*Agregado Miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio*”). A umidade obtida era lançada no *software* do sistema de balança da Central dosadora que efetuava automaticamente as correções necessárias. Após carregamento do concreto era adicionado, no redosador da Central dosadora, o aditivo superplastificante. Essa adição era procedida em volume, por profissional treinado por meio da utilização de baldes graduados. Em algumas oportunidades, houve o emprego de 100% de gelo em substituição à água de amassamento desse traço (caso de concretagens de elementos de fundação de grandes volumes). Tanto na adição de gelo, como de aditivo superplastificante e sílica ativa havia o controle das quantidades adicionadas, mediante acompanhamento de profissionais extras contratados junto ao Laboratório responsável pelo controle da resistência à compressão do concreto (contagem dos sacos de gelo, de sílica e verificação do volume de aditivo). Importante registrar que, uma vez fora da Central dosadora, não era permitido adicionar água ao concreto, em hipótese alguma. Caso houvesse necessidade de correção do espalhamento, era empregado o aditivo superplastificante (adicionado, eventualmente, em canteiro de obras por profissional treinado após autorização do responsável e somente para correção da fluidez do concreto fresco). Nesse contexto, o concreto foi fornecido sempre com o mesmo traço, pela mesma Central dosadora durante um período de 2 anos e 9 meses. No total, foram gerados, com este traço, aproximadamente 1.600 caminhões betoneira com, no máximo, 8m³ cada, totalizando cerca de 12.000m³ de concreto, ou seja, em média 360m³/mês.

2.2 Plano de controle da resistência adotado

O controle de resistência à compressão do concreto foi realizado por amostragem total respeitando as prescrições da norma ABNT NBR 12655 por Laboratório acreditado pelo INMETRO pertencente à Rede Brasileira de Laboratório de Ensaio (RBLE), que utilizou laboratoristas qualificados e certificados pelo IBRACON através de seu Núcleo de Qualificação e Certificação de Pessoal (NQCP).

O plano de controle da resistência do concreto adotado durante todo o processo de produção consistia na moldagem de 4 (quatro) corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm para cada um dos caminhões betoneira sendo, 1 (um) para ensaio de resistência à compressão aos 7 dias, 2 (dois) para 28 dias e 1 (um) para 63 dias de idade.

Os corpos de prova foram moldados em fôrmas metálicas em local plano, protegido das intempéries e, posteriormente (após desfôrma entre 24 h e 36 h), transportados em caixas de areia seca até a central do Laboratório de controle tecnológico localizado a uma distância de aproximadamente 15 km do canteiro de obras, para sazonalização e ensaio. Estes foram armazenados em câmara úmida, tiveram seus topos preparados por meio de retificação e foram ensaiados em prensas calibradas periodicamente, em conformidade com as normas ABNT NBR 5738:2015 “*Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*” e ABNT NBR 5739:2007 “*Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*”.

3. RESULTADOS

3.1 Apresentação dos resultados de resistência à compressão à luz da ABNT

A resistência à compressão de cada um dos exemplares foi determinada após ruptura dos corpos de prova, conforme prescrições da norma ABNT NBR 5739.

Na Fig. 2 está apresentada a carta de valores individuais das resistências à compressão do concreto aos 28 dias de idade, o histograma e a distribuição normal correspondente. Nesta carta, o eixo das abscissas, apresenta os exemplares em ordem cronológica e, o eixo das ordenadas, os valores de resistência à compressão de cada um dos exemplares [a maior resistência obtida na ruptura de 2 (dois) corpos de prova irmãos, conforme estabelecido na ABNT NBR 12655].

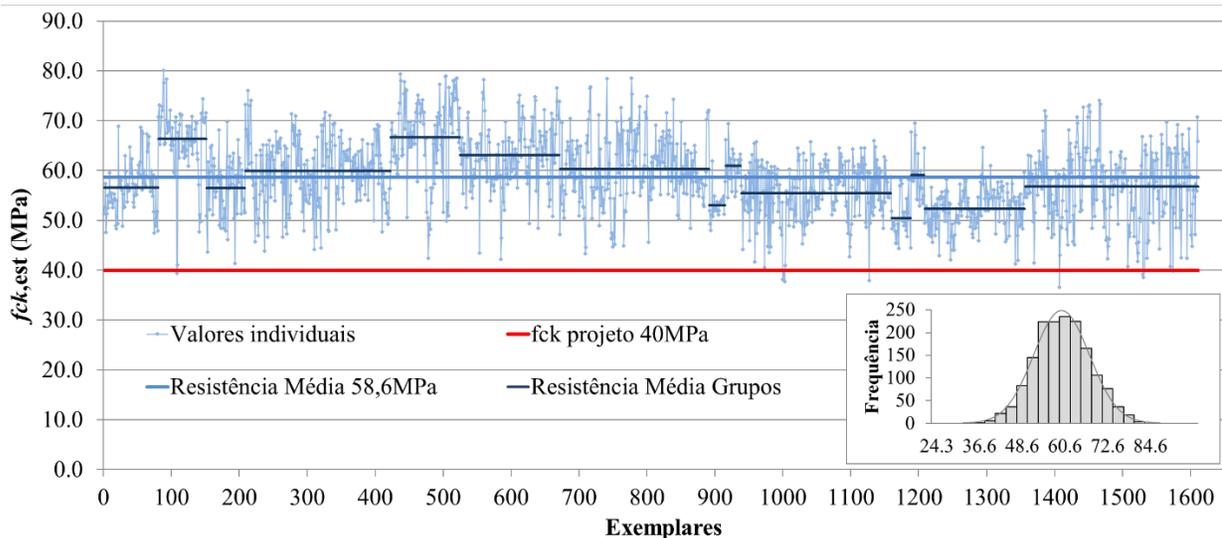


Figura 2. Carta de valores individuais com base nos resultados de resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade e histograma correspondente.

A carta apresenta cerca de 1600 resultados de resistência à compressão, obtidos ao longo de 2 anos e 9 meses. Estes resultados variaram de 36,6 MPa a 80,1 MPa, com média de 58,6 MPa, sendo o menor valor obtido equivalente a $0,91 \cdot f_{ck}$. Foram constatados 11 (onze) resultados abaixo da resistência especificada em projeto ($f_{ck} = 40\text{MPa}$), ou seja, cerca de 0,7% do total de caminhões. Em uma distribuição normal (curva de Gauss) o quantil de defeituosos corresponderia a um coeficiente de 2,46.

A variabilidade da resistência à compressão de um mesmo traço de concreto pode oscilar em torno de diferentes valores, pois no decorrer do processo produtivo ocorrem mudanças de centragem, principalmente devido a diferentes partidas de cimento e agregados.

Considerando o conceito de resistência característica do concreto descrito no subitem 12.2 “Valores característicos” da norma ABNT NBR 6118:2014 “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento”, o valor da resistência à compressão desse concreto, obtido diretamente da população, seria de $f_{ck,5\%} = 46,5\text{MPa}$. O desvio padrão das operações de produção e ensaio obtido foi $s_c = 6,6\text{MPa}$ e o coeficiente de variação $V_c = 11,2\%$.

Ainda, a resistência característica desse concreto adaptada do critério de amostragem parcial da ABNT NBR 12655, seria de $f_{ck,est} = f_{cm} - 1,65 \cdot s_c = 47,7\text{MPa}$, apesar que, neste caso, trata-se apenas de uma especulação matemática, pois o critério efetivo a ser utilizado deve ser o de amostragem total a 100%.

3.2 Avaliação do controle do processo de produção

De acordo com o item 7 “Análise do processo” da ABNT NBR 7212:2012 “Execução de concreto dosado em central – Procedimento” a avaliação do controle do processo deve ser realizada com base no desvio-padrão, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Desvio padrão do processo, ABNT NBR 7212:2012.

Local de preparo do concreto	Desvio padrão (MPa)			
	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Central	$s < 3,0$	$3,0 < s < 4,0$	$4,0 < s < 5,0$	$s > 5,0$

Dessa forma, por meio da análise do desvio padrão e dos critérios preconizados pela ABNT NBR 7212:2012, trata-se de uma Central Nível 4.

Ainda, de acordo com os parâmetros estabelecidos atualmente pela ABNT NBR 12655, esse desvio padrão da produção é elevado e não compatível com produção de concreto em usina, classe A. Por outro lado, a norma ABNT NB-1 de 1960, considerava que produção de concreto com desvio padrão igual ou inferior a 15% devia ser classificada como produção rigorosa, ou seja, corresponderia à melhor classificação na época.

Segundo o ACI 214 subitem 4.5 “Standards of control”, para concretos de $f_{ck} \geq 35\text{MPa}$ (caso em questão), o coeficiente de variação (V_c) é o parâmetro que deve ser usado para qualificar ou classificar o rigor de produção do concreto, conforme apresentado na Tabela 3, e nesse caso a produção pode ser classificada com rigor bom/razoável.

Tabela 3. Coeficiente de variação das operações de produção e ensaio (V_c), ACI 214.

Tipo de Serviço	Padrão de Controle				
	Excelente	Muito bom	Bom	Razoável	Deficiente
Controle em canteiro de obras	< 7,0%	7,0% a 9,0%	9,0% a 11,0%	11,0% a 14,0%	> 14,0%
Pesquisas em laboratório	< 3,5%	3,5% a 4,5%	4,5% a 5,0%	5,0% a 7,0%	> 7,0%

3.3 Influência das operações de ensaio e controle

Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade disponibilizados foram analisados, do ponto de vista da influência das operações de ensaio e controle, de acordo com os critérios recomendados pelo *American Concrete Institute* no ACI-214R-11 “Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete”.

Esta metodologia consiste no cálculo do desvio padrão e do coeficiente de variação devido às operações de ensaio e controle, tendo como base o resultado de resistência à compressão de corpos de prova irmãos e posterior comparação com os critérios de controles sugeridos no Capítulo 4 “Analysis of Strength Data” que estabelece o seguinte:

- a) Cálculo do desvio padrão das operações de ensaio e controle:

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

onde:

- s_e : desvio padrão das operações de ensaio em MPa;
 n : número de exemplares considerados compostos de p corpos de prova (nunca inferior a 10 exemplares);
 A : diferença entre o maior e o menor resultado de corpos de prova que representam um mesmo exemplar;
 d_2 : coeficiente que depende do número p de corpos de prova representativos de um mesmo exemplar, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Coeficientes d_2 para cálculo do desvio padrão das operações de ensaio e controle.

Número p de corpos de prova	d_2
2(dois)	1,128
3(três)	1,693
4(quatro)	2,059

b) Cálculo do coeficiente de variação ou variabilidade das operações de ensaio e controle:

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

onde:

- s_e : desvio padrão das operações de ensaio em MPa (valor obtido no item a);
 V_e : coeficiente de variação devido às operações de ensaio e controle (%);
 f_{cmj} : média de todos os resultados utilizados, a j dias de idade, em MPa.

c) Determinação do Padrão de Controle, conforme Tabela 5:

Tabela 5. Coeficiente de variação das operações de ensaio e controle (V_e), ACI 214.

Tipo de Serviço	Padrão de Controle				
	Excelente	Muito bom	Bom	Razoável	Deficiente
Controle em canteiro de obras	< 3,0%	3,0% a 4,0%	4,0% a 5,0%	5,0% a 6,0%	> 6,0%
Pesquisas em laboratório	< 2,0%	2,0% a 3,0%	3,0% a 4,0%	4,0% a 5,0%	> 5,0%

Considerando a diferença de resistência à compressão entre os 2(dois) corpos de prova irmãos rompidos aos 28 dias de idade, os resultados obtidos ao longo de todo o período de produção do concreto indicaram desvio padrão das operações de ensaio e controle (s_e) variando de 0,6MPa a 1,0MPa e coeficiente de variação devido as operações de ensaio e controle (V_e) entre 1,1% a 1,6%.

Sendo assim, conforme os limites preconizados pelo ACI 214, todos os resultados apontaram para um padrão de controle das operações de ensaio, em canteiro de obra, excelente. Observa-se, por outro lado, que os resultados obtidos são mais rigorosos que os ensaios realizados em pesquisas experimentais conduzidas em laboratório, o que não é comum.

3.4 Análise comparativa entre os métodos de controle propostos pela ABNT e ACI

Conforme detalhado anteriormente, o controle da resistência à compressão do concreto foi realizado por amostragem total de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR 12655. Entretanto, quando os valores de resistência à compressão dessa mesma produção de concreto são analisados à luz do ACI 318 o julgamento do processo não coincide. Isso se justifica devido ao fato dos procedimentos de amostragem, bem como os critérios de aceitação prescritos pelo ACI serem distintos do modelo adotado pela ABNT.

Quanto à amostragem, o ACI 318 no item 26.12 “*Concrete evaluation and acceptance*” recomenda como critérios mínimos:

- ✓ um exemplar por dia de concretagem;
- ✓ um exemplar para cada 115m³ de concreto produzido;
- ✓ um exemplar para cada 465m² de área superficial para lajes ou paredes;
- ✓ o controle para volumes inferiores a 38m³ é dispensado, desde que exista carta de traço aprovada.

Ainda, de acordo com o ACI 318, o valor da resistência à compressão de cada um dos exemplares é determinado pela média aritmética simples dos resultados obtidos. Conforme ASTM C39-16b “*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*”, caso os valores individuais dos corpos de prova irmãos difiram de mais de 8%, os resultados são inadequados e o ensaio deveria ser repetido. O ACI 318, assim como a ABNT NBR 12655 e a norma europeia EN-206:2013 “*Concrete – Specification, performance, production and conformity*”, também considera que de cada betonada moldada é obtido apenas 1(um) valor de resistência à compressão.

O ACI 318 prescreve os seguintes critérios de aceitação e conformidade:

- ✓ para $f_{ck} \leq 35\text{MPa}$, nenhum resultado individual deve ser inferior a $f_{ck} - 3,5\text{MPa}$;
- ✓ para $f_{ck} > 35\text{MPa}$ (caso em questão), nenhum resultado individual pode ser inferior a $0,9 \cdot f_{ck}$;
- ✓ a média móvel de quaisquer 3(três) resultados consecutivos devem ser iguais ou superiores a resistência característica definida em projeto (f_{ck}).

Dessa forma, a fim de realizar uma análise comparativa entre os controles efetuados pela ABNT e ACI, todos os valores de resistência à compressão obtidos aos 28 dias de idade também foram tratados e organizados de acordo com os critérios de amostragem e aceitação propostos pelo ACI 318, conforme apresentado adiante.

Considerando o critério mínimo de amostragem proposto pelo ACI de um exemplar a cada 115m³ de concreto (ou seja, uma moldagem de corpos de prova a cada 14 caminhões betoneira de 8m³), tornou-se possível analisar inúmeras combinações de resultados, uma vez que foram moldados corpos de prova para todos os caminhões betoneira (população). Sendo assim, para estudar todas as possibilidades, foram determinadas as envoltórias dos valores individuais e da média móvel de 3(três) resultados consecutivos (valores máximos e mínimos assumidos).

Conforme critério preconizado pelo ACI 318 todos os valores individuais devem ser maiores que 36MPa ($0,9 \cdot f_{ck}$). Observa-se na Fig. 3 (envoltória dos valores individuais) que, diante de todas as possibilidades, nenhum valor é menor que 36 MPa (salienta-se que o menor valor médio individual registrado foi de 36,2MPa). Logo, este critério de aceitação foi sempre atendido.

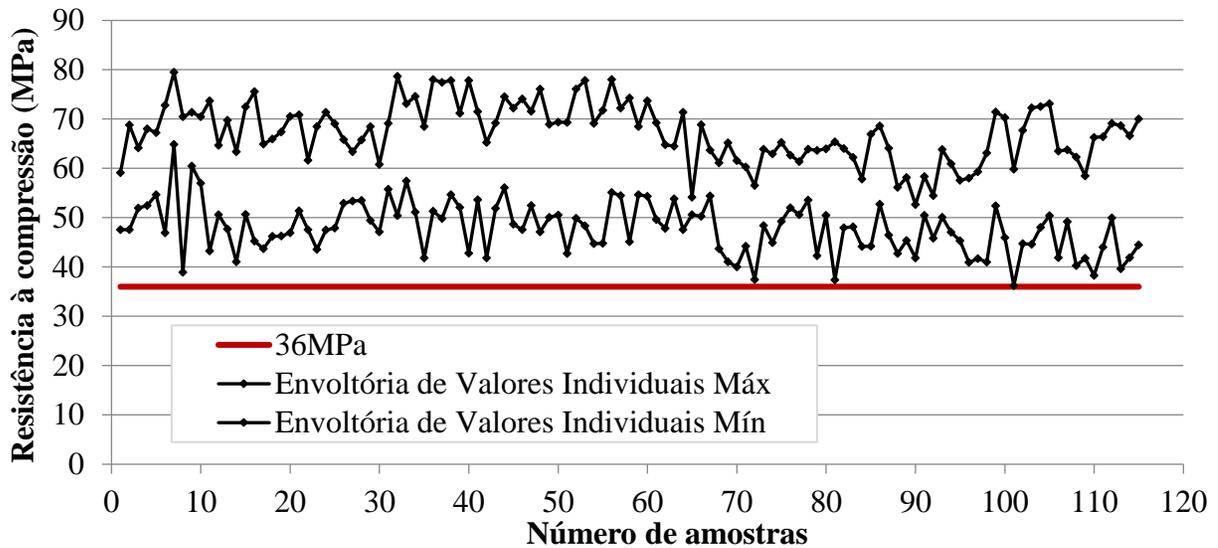


Figura 3. Envoltória de resistência à compressão dos valores médios individuais de cada caminhão betoneira.

Ainda, de acordo com o ACI, para garantir a aceitação do concreto, deve-se efetuar outro tipo de análise. Na Fig. 4 está apresentada a envoltória da média móvel ao longo de todo o período de produção [valores máximos e mínimos de quaisquer 3 (três) resultados consecutivos]. Nota-se que em nenhum caso a média móvel foi inferior à resistência característica definida em projeto (40MPa). O menor valor registrado foi de 40,1MPa. Sendo assim, seja qual for a combinação de resultados considerada, esse critério de aceitação também foi sempre atendido.

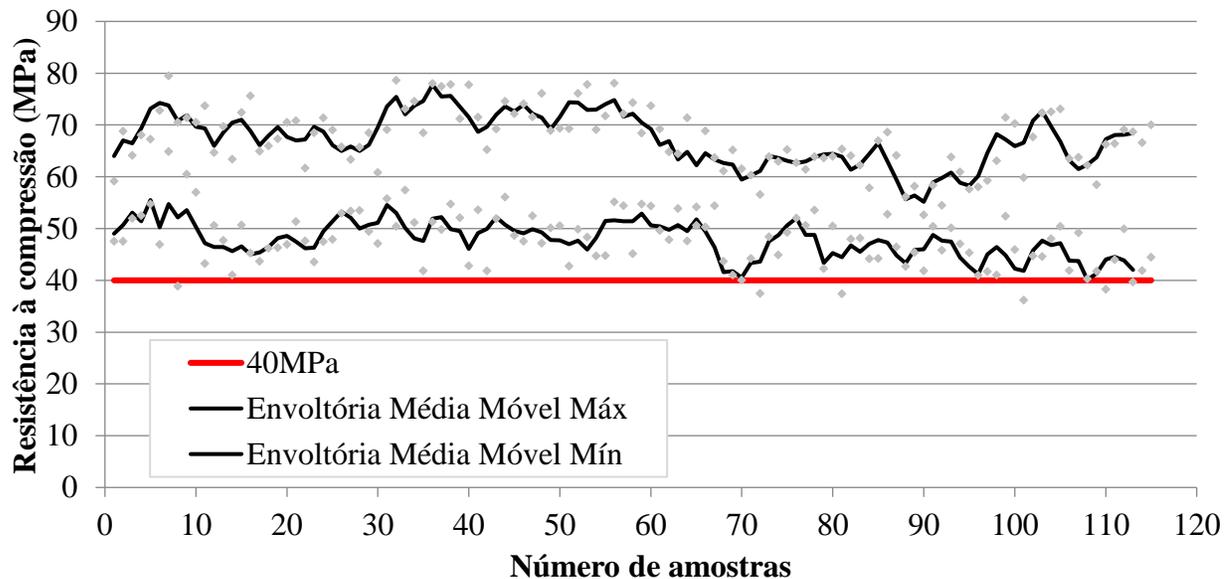


Figura 4. Envoltória da média móvel de 3 valores consecutivos ao longo do período de produção.

Portanto, considerando o cenário mais desfavorável possível, se o controle tecnológico do concreto fosse realizado à luz do ACI 318 não existiriam não conformidades uma vez que ambos os critérios (valores individuais e média móvel) sempre foram atendidos simultaneamente.

3.5 Análise comparativa entre os métodos de controle propostos pela ABNT e EN

Assim como a norma americana, a metodologia europeia EN 206 considera 2 (dois) critérios para análise da conformidade da resistência à compressão do concreto: critério para resultados individuais e critério para resultados médios. No caso da análise por meio do critério individual, cada resultado deve satisfazer a seguinte condição: todo e qualquer valor individual deve ser $\geq f_{ck} - 4\text{MPa}$.

Quanto ao critério para resistências médias, a norma em questão permite que, a resistência à compressão seja avaliada por um dos seguintes métodos:

- ✓ método A ou controle da produção inicial. Neste caso, a resistência média de 3 (três) resultados consecutivos deve ser $\geq f_{ck} + 4\text{MPa}$, sendo que os critérios de conformidade foram desenvolvidos com base em resultados de ensaio não sobrepostos. Logo, a aplicação de critérios de sobreposição de resultados (média móvel de resultados consecutivos) aumenta o risco de rejeição;
- ✓ método B ou controle de produção contínua. Trata-se de uma opção quando os critérios de produção contínua são estabelecidos, ou seja, quando pelo menos 35 (trinta e cinco) resultados de ensaios estão disponíveis em um período de 3 (três) meses. De acordo com este método, a média de 15 (quinze) ou mais resultados consecutivos [disponibilizados em um período não superior a 3 (três) meses] deve ser $\geq f_{ck} + 1,48*\sigma$ (adotando-se como σ o desvio padrão determinado no final do controle de início de produção).

A EN 206 ainda permite que a conformidade da resistência à compressão do concreto seja avaliada pelo emprego de gráficos de controle (método C), desde que as condições de produção contínua estejam estabelecidas e que esta seja certificada por terceiros, o que não é o caso desse estudo.

Quanto à formação dos lotes, quando a produção contínua é realizada em centrais de concretos com certificação de controle de produção, as amostras devem ser retiradas a cada 200 m³ (ou uma a cada 3 dias de produção). Se a produção de concreto não possuir certificação de controle de produção (caso em questão), as amostras devem ser retiradas a cada 150 m³ (ou uma por dia de produção). Importante: nos primeiros 50 m³ de produção devem ser retiradas 3 (três) amostras, no mínimo.

É válido registrar que esta norma permite como resultado de um exemplar o valor obtido de um único corpo de prova ou, no caso de mais rupturas, o resultado é definido como o valor médio. Os resultados individuais que se afastarem mais de 15% do valor da média devem ser desconsiderados.

Sendo assim, analogamente ao caso discutido anteriormente (ACI), uma vez que foram moldados corpos de prova para todos os caminhões betoneira (população), no caso da EN também foi possível efetuar uma análise considerando inúmeras combinações de resultados.

De acordo com o critério mínimo de amostragem proposto pela EN de 3 (três) exemplares nos primeiros 50 m³ de produção e, posteriormente, 1 (um) exemplar a cada 150 m³ de concreto (ou seja, uma moldagem de corpos de prova a cada 18 caminhões betoneira de 8 m³), obteve-se a envoltória de valores individuais apresentada na Fig. 5.

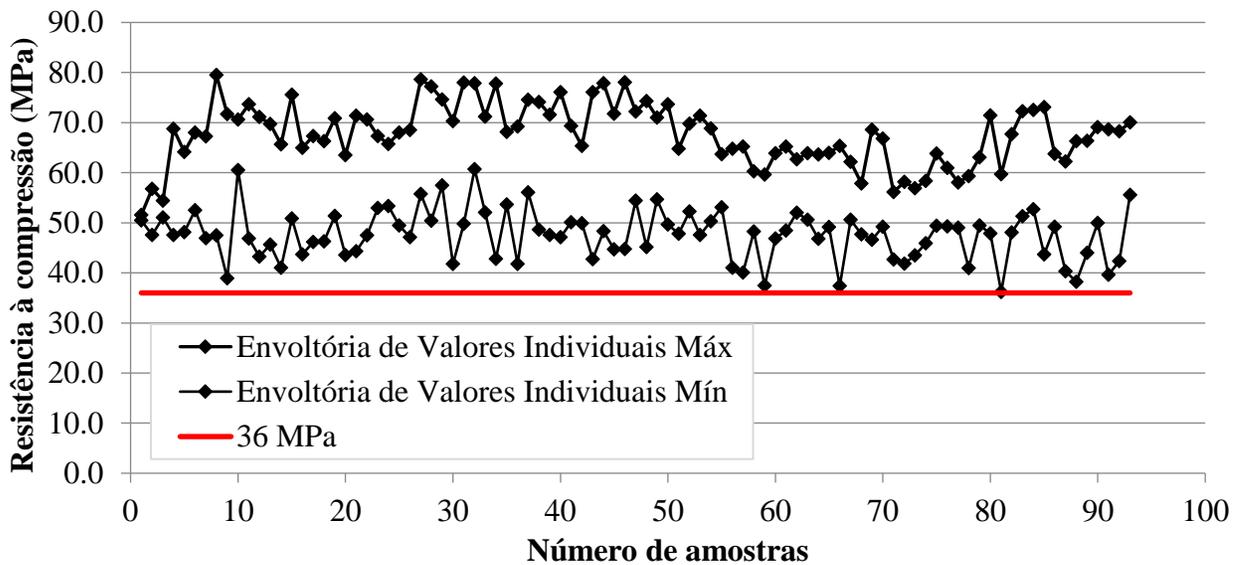


Figura 5. Envoltória de resistência à compressão dos valores individuais.

Nota-se que, durante o período de produção, o critério de valores individuais preconizado no subitem 8.2.1.3.1 “*Criteria for individual results*” da EN 206:2013 foi atendido em todos os casos. Novamente, vale lembrar que o menor valor de resistência à compressão obtido nesse período foi de 36,2 MPa, considerando a média dentre 2 (dois) corpos de prova irmãos.

Quanto a análise dos resultados médios, de forma a contemplar todas as possibilidades, considerou-se a envoltória dos valores médios de 3 (três) resultados consecutivos não sobrepostos, conforme evidenciado na Fig. 6.

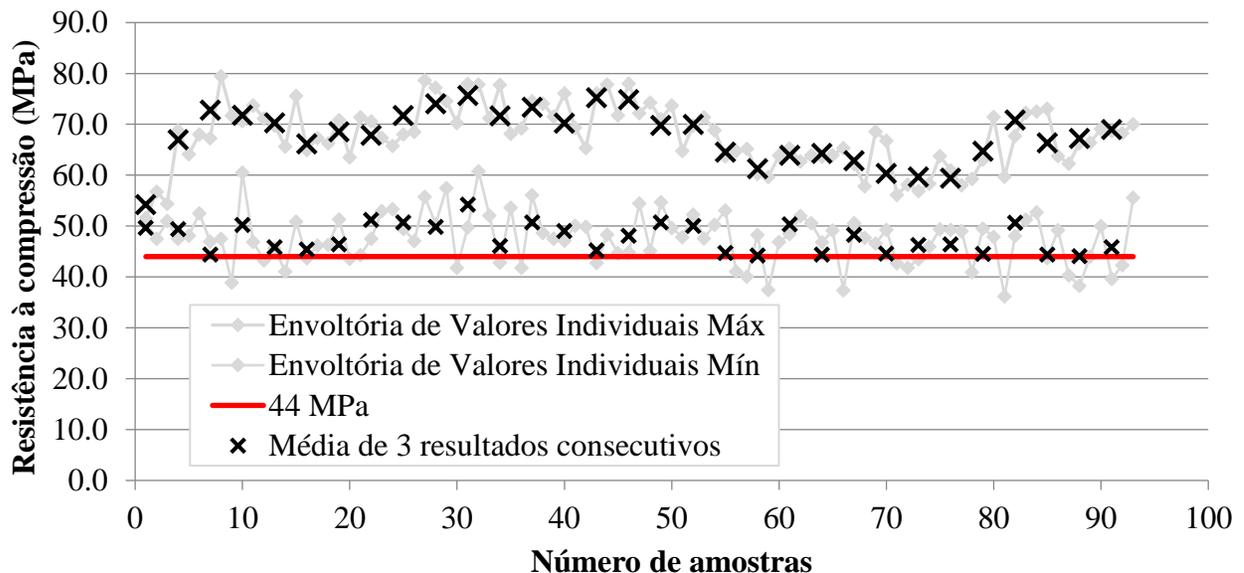


Figura 6. Envoltória da média de 3 (três) valores consecutivos não sobrepostos ao longo do período de produção.

Assim como no caso da curva dos valores individuais, a curva de valores médios obtida durante todo o período de produção sempre atendeu as exigências estabelecidas no subitem 8.2.1.3.2 “*Criteria for mean results*” da EN 206:2013. Neste caso, o menor valor obtido foi de 44,1MPa, ou seja, superior ao critério $\geq f_{ck} + 4\text{MPa} = 44\text{MPa}$.

Vale registrar que os critérios de segurança das estruturas estabelecidos na norma europeia são distintos dos critérios adotados pelas normas americana e brasileira, pois envolvem probabilidades de ruptura, valores característicos das ações e das resistências diferentes. Logo, é razoável esperar que os valores de resistência à compressão obtidos neste caso sejam um pouco diferentes dos casos anteriores.

4. CONCLUSÕES

O controle de resistência à compressão do concreto preconizado pela normalização brasileira é muito rigoroso e o mais seguro. A amostragem é total a 100% (população) e os resultados são analisados individualmente, sem tolerâncias, ou seja, todo e qualquer valor de resistência que esteja inferior à especificação de projeto será considerado não conforme, por menor que seja a diferença. Entretanto, apesar de muito seguro, trata-se de um controle oneroso, pois envolve a moldagem, manuseio, transporte, cura, retificação e ruptura de muitos corpos de prova do concreto de todos os caminhões betoneira recebidos em obra (controle por amostragem total).

Nota-se que a metodologia de controle prescrita pelo ACI 318 e EN 206 é muito mais branda, quando comparada aos critérios da norma brasileira. Nestas normas o controle não é realizado por amostragem total, são estabelecidas tolerâncias para os valores individuais de resistência à compressão e, além disso, também se aplica o conceito da média de resultados consecutivos como critério de aceitação.

Na opinião dos autores deste artigo os critérios de aceitação e conformidade preconizados pela ABNT NBR 12655 são exigentes e caberia flexibilizar o valor de resultados individuais dentro de uma margem de até $0,9 * f_{ck}$. Por outro lado, o critério de amostragem adotado no Brasil se coloca a favor da segurança e na opinião destes autores, apesar de oneroso, deve ser mantido como está.

Neste estudo de caso, os resultados obtidos por meio do controle tecnológico prescrito pela ABNT NBR 12655 apontaram para um índice de não conformidade relacionado com a resistência à compressão do concreto de 11 vezes em aproximadamente 1.600 caminhões betoneira (0,7%). Essa não conformidade pouco importante gerou desgastes e revisões de projeto absolutamente desnecessárias. Em contrapartida, os mesmos resultados, quando analisados à luz das metodologias prescritas pelo ACI 318 e EN 206, indicaram um índice de não conformidade nulo. Adotar a flexibilização e aceitar alguns poucos valores individuais de até $0,9 * f_{ck}$ como conformes, certamente impactaria de maneira positiva no processo de produção, minimizando possíveis custos, retrabalhos, revisões de projeto, atrasos em cronogramas de obra e desgastes desnecessários entre os intervenientes da cadeia produtiva do concreto, sem comprometimento da segurança, durabilidade e qualidade final das estruturas de concreto.

5. REFERÊNCIAS

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.