



## Análise de concretos com não conformidades: efeitos de longa duração

B. Fernandes<sup>1</sup>, R. Christ<sup>1</sup>, U. Quinino<sup>1</sup>, B. Tutikian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>itt Performance, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Brasil.

### Información del artículo

#### DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i3.154>

Artículo recibido el 03 de Marzo de 2016, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 19 de Julio de 2016. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2017.

© 2016 ALCONPAT Internacional

### Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 3, Septiembre – Diciembre 2016, 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://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, fecha de publicación: 30 de septiembre de 2016.

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.

## RESUMO

O presente artigo tem como objetivo contribuir para a análise de concretos com não conformidades, com foco nos efeitos de longa duração. Foi realizado um levantamento dos intervenientes na análise de não conformidades: evolução da resistência à compressão, a variabilidade dos resultados e critérios de aceitação do concreto. De forma complementar, é apresentado o estudo de caso de concretos não conformes empregados em estrutura mista (pilares metálicos preenchidos) que apresentaram resistências abaixo do especificado aos 28 dias. Considerando os efeitos de longa duração, um ganho de resistência nominal acima dos limites normativos foi observado. Esta análise, aliada a uma revisão do projeto e a uma inspeção criteriosa, pode auxiliar na tomada de decisão em casos de concretos não conformes.

**Palavras-chave:** não conformidade; crescimento de resistência; segurança estrutural.

## ABSTRACT

The paper aims to contribute to the analysis of non-conformity concrete, focusing on long time effects. A review of compressive strength evolution, results variability and acceptance criteria was made. In addition, it is presented a case study of a nonconforming concrete used in composite structures (concrete-filled steel columns) that present 28-day strength below the specified. Considering long time effects, a nominal strength gain above the limits considered in technical standards was observed. This analysis, associated with a revision of the structural design and a carefully assessment, could help decision taking in case of non-conformity concretes.

**Keywords:** non-conforming; strength gain; structural safety.

## RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo contribuir al análisis del concreto en casos de incumplimiento normativo, centrado en los efectos a largo plazo. Se llevó a cabo una encuesta entre los participantes en el análisis de no conformidades: evolución de la resistencia a la compresión, variabilidad de los resultados y criterios de aceptación. Complementariamente, se presenta un caso de estudio de un hormigón en incumplimiento utilizado en una estructura mixta (pilares metálicos rellenos) que mostró una a 28 días menor que la especificada. Teniendo en cuenta los efectos a largo plazo, se observó una ganancia de resistencia nominal por encima de los límites reglamentarios. Este análisis, junto con una revisión del proyecto y una inspección minuciosa puede ayudar en la toma de decisiones en casos de hormigón en incumplimiento.

**Palabras clave:** incumplimiento; ganancia de resistencia; seguridad estructural.

Autor de contacto: Bernardo Tutikian ([bftutikian@unisinis.br](mailto:bftutikian@unisinis.br))

## 1. INTRODUÇÃO

A elevada resistência mecânica associada ao reduzido custo de produção e à facilidade de moldagem para as variadas geometrias fazem do concreto o material mais empregado nas construções, se destacando frente aos demais materiais nos aspectos técnicos e econômicos (Mehta; Monteiro, 2014). Consequentemente, na medida em que há uma aceleração no seu consumo, espera-se que cresça a quantidade de estruturas projetadas e dimensionadas que necessitam de avaliação do seu desempenho frente às funções para as quais foram destinadas, conciliando os aspectos técnicos referentes à eficiência. Escolher bem os materiais, bem como investigar os efeitos das tecnologias empregadas, associados ao aperfeiçoamento do sistema estrutural são fatores importantes para garantir as condições de segurança.

De um modo geral, a introdução desta segurança no projeto estrutural é implementada por meio de coeficientes que reúnem as imprecisões inevitáveis por engano de carga ou pelo desvio do comportamento das propriedades mecânicas dos materiais. Além disso, contemplam as imperfeições das tensões atuantes em virtude das simultâneas ações que a estrutura deve suportar. Devem ser incluídos nestas incertezas os erros decorrentes da adoção de uma concepção simplificada ou da capacidade de redistribuição dos esforços produzidos pelos eventuais danos. Quando esses aspectos e coeficientes não são contemplados de maneira adequada, negligenciados ou não são devidamente fiscalizados, há um aumento das ocorrências de não conformidades e, desta maneira, promovem a necessidade de serem investigados, pois o resultado pode evidenciar problemas que levam ao questionamento do projeto estrutural, à eventual execução de reparos ou condenação total e/ou parcial de alguns elementos.

Neste cenário, diversos são os estudos e pesquisas destinados ao entendimento das não conformidades em sistemas estruturais de concreto, abordando aspectos relativos à segurança, confiabilidade e análise de risco (Kausay; Simon, 2007; Pereira, 2008; Caspee; Taerwe, 2011; Helene, 2011; Santiago, 2011; Santiago; Beck, 2011; Caspee; Taerwe, 2014; Larrossa et al, 2014; Magalhães, 2014; Rao et al, 2014; Couto et al, 2015; Magalhães et al, 2015). No Brasil, o assunto levou ao surgimento de um grupo de estudos da Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE), que resultou na recomendação ABECE 001: Análise de Casos de Não Conformidade do Concreto. Ressalta-se que a verificação da segurança de estruturas de concreto com não conformidades engloba diversas etapas e métodos, que vão desde a extração de corpos de prova até a revisão do projeto, considerando a nova resistência (Silva Filho; Helene, 2011).

O presente artigo tem como objetivo realizar uma revisão de alguns dos principais fatores intervenientes na análise de não conformidades em concretos. São abordados aspectos relativos à variabilidade dos resultados de ensaios de compressão axial, dos critérios de aceitação do concreto e da evolução da resistência à compressão levando em consideração os efeitos de longa duração. Esta revisão é complementada com um estudo de caso de uma estrutura mista, com pilares de aço preenchidos com concreto armado, que apresentou resistência à compressão inferior a especificada pelo projetista. Com esta análise dos efeitos do tempo na resistência do concreto, pretende-se contribuir na tomada de decisão na análise das não-conformidades em estruturas de concreto.

## 2. ANÁLISE DE CONCRETOS COM NÃO CONFORMIDADES

### 2.1 Considerações sobre a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo

Uma das possíveis abordagens para a avaliação da segurança estrutural consiste na análise do comportamento do concreto ao longo do tempo, considerando os efeitos de evolução da resistência e das cargas de longa duração. Ao determinar a tensão admissível de compressão,  $\sigma_{cd}$ , são utilizados os coeficientes de ponderação  $\gamma_c$  e  $\beta$  - valores de cálculo obtidos com base em valores característicos, definidos a partir de considerações probabilísticas para cada tipo de estado limite. O coeficiente  $\gamma_c$

representa as diferenças existentes entre o concreto do corpo de prova e o material de constituição do elemento estrutural em si, além de considerar incertezas referentes as solicitações (Couto *et al*, 2015), enquanto que o  $\beta$  é derivado do produto de coeficientes parciais, ou seja, pela multiplicação dos efeitos benéficos da evolução da resistência à compressão ao longo do tempo ( $\beta_1$ ) pelos efeitos prejudiciais das cargas de longa duração ( $\beta_2$ ) (Silva Filho; Helene, 2011).

A evolução da resistência à compressão ao longo do tempo pode ser calculada mediante utilização de modelos matemáticos relacionados à resistência à compressão obtida aos 28 dias (Klemczak *et al*, 2015). Sabe-se que esta evolução varia em função do tipo de cimento, da temperatura ambiente, assim como das condições de cura (CEB, 1990). Mantidas condições de cura ideais e temperatura de 20°C, é possível estimar o desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo, através das equações (1) e (2), estabelecidas pelo *fib Model Code 2010* (CEB, 2012). Ressalta-se que esta formulação é admitida pela ABNT NBR 6118:2014, para idades inferiores a 28 dias.

$$f_{cm}(t) = \beta_1(t) \times f_{cm} \quad (1)$$

$$\beta_1(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \sqrt{\left( \frac{28}{t} \right)} \right] \right\} \quad (2)$$

$f_{cm}(t)$ : Resistência à compressão a t dias;

$f_{cm}$ : Resistência à compressão aos 28 dias;

$\beta_1(t)$ : Coeficiente em função do tempo (t);

t: Idade na qual deseja-se obter a resistência à compressão;

s: Coeficiente que depende do tipo de cimento: s=0,20: para cimentos de alta resistência e rápido endurecimento (caso do CPV-ARI no Brasil); s=0,25: para cimentos normais e rápido endurecimento (caso do CPI e CPII no Brasil); e s=0,38: para cimentos de endurecimento lento (caso do CPIII e CPIV no Brasil).

A perda de capacidade resistente por efeito da carga de longa duração foi estudada por Rüsç (1960). Este decréscimo é constante e independente do  $f_{ck}$  do concreto em estudo, além de ser, no máximo, de 25%. O *fib Model Code 2010* (CEB FIP, 2012) propõe a equação (3) para a determinação do coeficiente  $\beta_2$ , sendo que o fator de decréscimo varia em função do período no qual a estrutura estará carregada.

$$\beta_2 = \frac{f_{c,sus,j}}{f_{c,t_0}} = 0,96 - 0,12 \times \sqrt[4]{\ln(72 \times (j - t_0))} \quad (3)$$

$f_{c,sus,j}$ : Resistência à compressão do concreto sob carga mantida, na idade j dias, em MPa;

$f_{c,t_0}$ : Resistência potencial à compressão do concreto na data (idade)  $t_0$  instantes antes de aplicação da carga de longa duração, em MPa;

$\beta_2$ : Efeitos prejudiciais das cargas de longa duração (t);

$t_0$ : Idade de aplicação da carga, em dias, considerada significativa;

j: Qualquer idade do concreto a posteriori de  $t_0$ ; expressa em dias.

Estima-se que a norma brasileira, ABNT NBR 6118:2014, estabelece valores de 1,16 para  $\beta_1$  e 0,73 para  $\beta_2$ , considerando valores de carga dos 28 dias até 50 anos, resultando em um  $\beta$  de 0,85. Observa-se que os valores utilizados são conservadores, visto que admite um crescimento de resistência de apenas 16% num período de 50 anos e um valor de decréscimo maior que o máximo estabelecido por Rüsç (1960) (Helene, 2011). Deste modo, torna-se adequado verificar os valores de  $\beta_1$  e  $\beta_2$ ,

considerando a fórmula proposta pelo *fib Model Code 2010* (CEB, 2012) e as considerações feitas por Rüschi (1960).

## 2.2 Considerações sobre a variabilidade dos resultados de resistência à compressão

Outro fator a ser verificado é a variabilidade dos resultados do ensaio de resistência à compressão. Magalhães (2014) ressalta que todas as etapas da produção do concreto acarretam na dispersão dos resultados do controle tecnológico, sendo que estes podem ser separados em três diferentes aspectos: influência dos materiais, dos mecanismos de produção e do procedimento de ensaio. A Tabela 1 apresenta os principais fatores que podem influenciar o resultado da resistência à compressão do concreto, bem como a variabilidade máxima do item.

Tabela 1. Fatores que influenciam o resultado do ensaio de resistência à compressão

| Origem da Variação            |                                                          | Variabilidade máxima                            |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Materiais</b>              | Variabilidade da resistência do cimento                  | $\pm 12\%$                                      |
|                               | Variabilidade da quantidade total de água                | $\pm 15\%$                                      |
|                               | Variabilidade dos agregados                              | $\pm 8\%$                                       |
| <b>Mão de Obra</b>            | Variabilidade do tempo e procedimento de mistura         | -30%                                            |
| <b>Equipamento</b>            | Ausência de aferição de balanças                         | -15%                                            |
|                               | Mistura inicial, sobre e subcarregamento, correias, etc. | -10%                                            |
| <b>Procedimento de Ensaio</b> | Coleta imprecisa                                         | -10%                                            |
|                               | Adensamento inadequado                                   | -50%                                            |
|                               | Cura (efeito considerado a 28 dias ou mais)              | $\pm 10\%$                                      |
|                               | Capeamento inadequado                                    | -30% para concavidade;<br>-50% para convexidade |
|                               | Ruptura (velocidade de carregamento)                     | $\pm 5\%$                                       |

Fonte: Adaptado de Helene e Terzian (1992).

É possível observar que os diversos procedimentos envolvidos no preparo, na coleta e no ensaio podem afetar, diretamente, os resultados dos ensaios, podendo reduzir, em até 50%, a resistência à compressão do concreto analisado. De fato, esta variabilidade apresenta-se verdadeira ao observar os dados oriundos de pesquisas e ensaios laboratoriais. Santiago (2011) compilou dados do controle tecnológico de mais de seis mil corpos de prova, oriundos de nove estados Brasileiros. O autor identificou percentuais não conformes de até 28%, para concretos de classe C40. Este valor chega a 84%, para concretos de classe C50.

## 2.3 Considerações sobre a aceitação do concreto

Outro ponto que deve ser considerado é questão do recebimento e aceitação do concreto. Ao observar as principais normas nacionais e internacionais referentes a estruturas de concreto, verificam-se pontos divergentes em relação ao método e aos critérios de aceitação (Pacheco; Helene, 2013; Magalhães, 2014).

A norma nacional, NBR 12655 (ABNT, 2015) apresenta dois tipos de controle de amostragem: total e parcial. Na amostragem parcial, são moldados corpos de prova cilíndricos em apenas algumas betonadas. Já na amostragem total, é realizado o controle de todas as betonadas realizadas, sendo o critério de aceitação que nenhuma seja inferior a resistência à compressão característica. Apesar do elevado custo, este tipo de amostragem é amplamente utilizado no Brasil (Pacheco; Helene, 2013).

A norma americana, *ACI 318-11: Building Code Requirements for Structural Concrete*, estabelece três diferentes critérios: a média de 3 resultados consecutivos deve ser igual ou superior a resistência

característica definida em projeto; nenhum resultado individual deve ser inferior a  $f_{ck}-3,5\text{MPa}$  (para concretos com  $f_{ck}$  abaixo de 35 MPa) e que nenhum resultado individual seja inferior a  $0,9 \cdot f_{ck}$  (para concretos com  $f_{ck}$  abaixo de 35 MPa) (Magalhães, 2014). Adicionalmente, a mesma norma não prevê a amostragem total, estabelecendo critérios mínimos de único exemplar por dia de concretagem, para cada 115 m<sup>3</sup> de material ou para cada 465 m<sup>2</sup> de área construída (Pacheco; Helene, 2013).

Outra norma amplamente utilizada, a *BS EN 206:2013 - Concrete. Specification, performance, production and conformity*, apresenta diferentes critérios em função do período da obra: início da produção e produção contínua, quando já foram realizados mais que 15 resultados (Magalhães, 2014).

O primeiro critério é referente à média de resultados, que deve ser maior ou igual a  $f_{ck}+4,0\text{MPa}$ , para controle inicial, e maior ou igual a  $f_{ck}+1,48 \cdot s$  (desvio padrão dos resultados), para produção contínua. O segundo critério é refere aos resultados individuais, que, para ambos tipos de produção, devem ser maiores que  $f_{ck}-4,0\text{MPa}$  (Pacheco; Helene, 2013; Magalhães, 2014).

Larossa *et al* (2014) realizaram a comparação dos critérios de amostragem das três normas apontadas, para 32 lotes de concreto. Os autores apontam que a NBR 12655 (ABNT, 2015) é o método mais rígido, sendo seguido pela EN 206 e ACI 318-11. De fato, comparando os procedimentos de aceitação adotados pelas normas internacionais com o estabelecido pelas recomendações da norma nacional, verifica-se que os critérios de aceitação são mais restritivos (Pacheco; Helene, 2013; Magalhães, 2014).

### 3. ESTUDO DE CASO

#### 3.1 Procedimentos metodológicos

No controle tecnológico realizado em uma obra, seguindo o procedimento estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 2015), a resistência à compressão ( $f_c$ ) de três betonadas de volume de 8m<sup>3</sup> foi inferior ao  $f_{ck}$  de 40 MPa, especificado pelo projetista. Como a obra apresenta impeditivos para a extração de corpos de prova, visto que a estrutura é de aço preenchido com concreto armado, foi realizado um estudo a respeito da evolução de resistência do concreto, de modo a auxiliar na aferição da segurança estrutural da obra. Ressalta-se que esta análise é complementar, e deve ser realizada em conjunto com outras verificações, como revisão do projeto estrutural considerando  $f_c$  obtido no ensaio e a realização de ensaios não destrutivos. A composição do concreto estudado está apresentada na tabela 2.

Tabela 2. Traço do concreto em estudo

| Material                   | Quantidade | Unidade |
|----------------------------|------------|---------|
| Cimento CPV-ARI RS         | 341        | kg      |
| Pozolana                   | 114        | kg      |
| Areia Fina                 | 284        | kg      |
| Areia Média                | 426        | kg      |
| Brita 0                    | 1025       | kg      |
| Água                       | 191        | l       |
| Aditivo Polifuncional      | 3,41       | kg      |
| Aditivo Superplastificante | 1,14       | kg      |

Fonte: carta traço fornecida pela empresa responsável pelo concreto

Nas datas especificadas de rompimento, realizaram-se os ensaios, em laboratório acreditado, seguindo os procedimentos normativos. Todos os corpos-de-prova foram fresados e os rompimentos ocorreram em uma máquina universal *EMIC – PC 200 CS*. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados do ensaio de resistência à compressão das amostras não conformes

| Amostra | Abatimento (mm) | Data de Ruptura | Idade (dias) | $\phi$ (mm) | $f_c$ (MPa) | $f_c$ potencial (MPa) |
|---------|-----------------|-----------------|--------------|-------------|-------------|-----------------------|
| 1       | 180             | 18/02/2015      | 7            | 100         | 23,9        | 23,9                  |
|         |                 | 18/02/2015      | 7            | 100         | 23,3        |                       |
|         |                 | 11/03/2015      | 28           | 100         | 35,2        | 37,1                  |
|         |                 | 11/03/2015      | 28           | 100         | 37,1        |                       |
| 2       | 230             | 18/02/2015      | 7            | 100         | 23          | 24,6                  |
|         |                 | 18/02/2015      | 7            | 100         | 24,6        |                       |
|         |                 | 11/03/2015      | 28           | 100         | 37,4        | 37,4                  |
|         |                 | 11/03/2015      | 28           | 100         | 34,6        |                       |
| 3       | 200             | 31/03/2015      | 7            | 100         | 23,3        | 23,9                  |
|         |                 | 31/03/2015      | 7            | 100         | 23,9        |                       |
|         |                 | 21/04/2015      | 28           | 100         | 38,2        | 38,6                  |
|         |                 | 21/04/2015      | 28           | 100         | 38,6        |                       |

Fonte: Adaptado dos relatórios de ensaio

No que se refere ao controle tecnológico utilizado na obra, é importante mencionar que foi executado por amostragem total (100%), na qual todas as betonadas foram amostradas. Neste caso, a NBR 12655 (2015) estabelece que a aceitação do concreto é estabelecida quando todos os exemplares da amostragem atenderem ao valor do  $f_{ck}$  especificado pelo projetista. Como pode ser visto na tabela 3, as resistências potenciais, aos 28 dias, não apresentaram resistência igual ou superior à definida, de 40 MPa.

Outro ponto levantado foi o histórico do crescimento de resistência após os 28 dias. Em um levantamento realizado pela empresa, no período de um ano, o concreto apresentou um crescimento de 32,6% (cimento CPV-ARI resistente a sulfato com adição de 22% de pozolona), superior aos 16% considerados pela ABNT NBR 6118:2014.

### 3.2 Resultados e análises

A partir dos valores obtidos, foi realizada a análise da evolução da resistência à compressão do concreto. Inicialmente, foram calculados os valores de  $\beta_1$  utilizando um coeficiente  $s$  de 0,20, visto que o cimento utilizado no traço é do tipo CPV-ARI. Contudo, como foi realizada adição de pozolanas na ordem de 33% em relação ao cimento, tornou-se adequado calcular o  $\beta_1$  para um cimento do tipo CPIV, pois este contém entre 15 e 50% de pozolana. Por último, calculou-se um terceiro valor de  $\beta_1$ , para um valor  $s$  intermediário. Os valores de  $\beta_1$  para 50 anos, utilizados no cálculo do  $\beta$ , são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Coeficientes de  $\beta_1$  para diferentes tipos de cimento

| Valores de $\beta_1$ para 50 anos |      |
|-----------------------------------|------|
| CPV-ARI                           | 1,21 |
| CP “Intermediário”                | 1,33 |
| CPIV                              | 1,44 |
| ABNT NBR 6118:2014                | 1,16 |

A evolução da resistência à compressão ao longo do tempo para as três situações (CPV-ARI, CPIV e CP “intermediário”), considerando o menor valor de  $f_{ck,est}$  (37,1 MPa) e um período de 365 dias, pode ser observada na Figura 1.

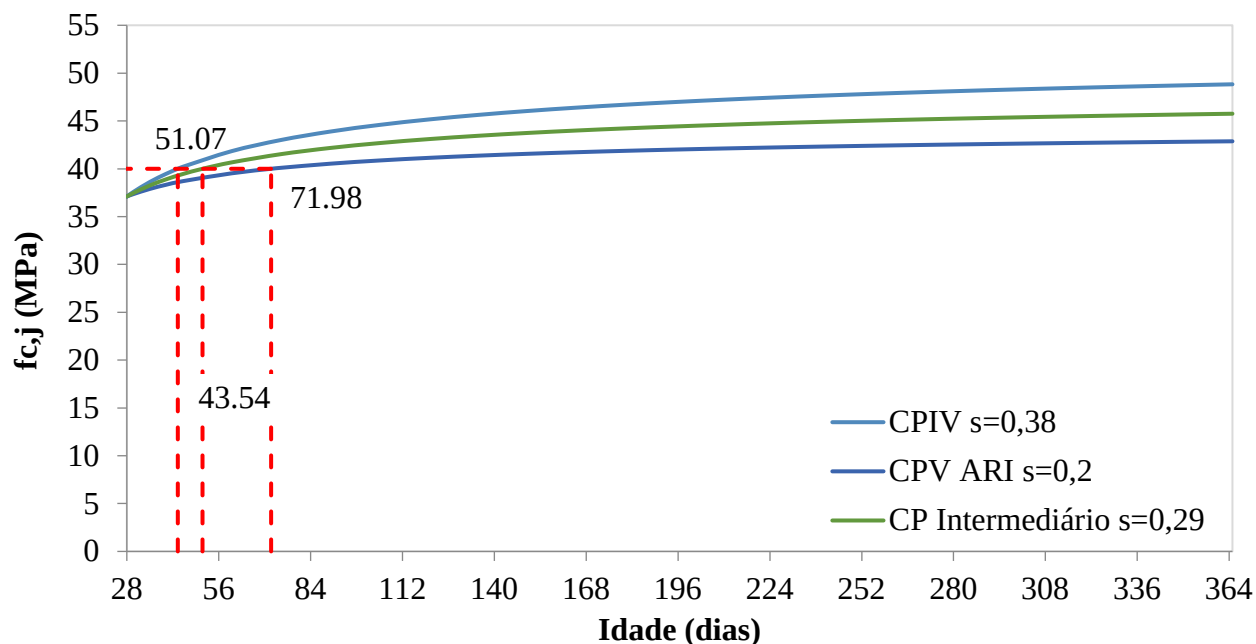


Figura 1. Evolução da resistência conforme fib Model Code 2010

Na figura se observa que, para atingir os 40 MPa especificados, se levará 45 dias considerando o  $\beta_1$  para o concreto com CPIV, 51 dias para o  $\beta_1$  considerando CP “intermediário” e 72 dias para o  $\beta_1$  com CPV ARI.

Após a definição do  $\beta_1$ , calculou-se o coeficiente  $\beta$ , considerando duas condições de  $\beta_2$  - 0,73, conforme preconizado pela ABNT NBR 6118:2014; e 0,75, máximo valor conforme Rüsç (1960). Os valores estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5. Coeficientes de  $\beta$  para diferentes tipos de cimento e carregamento

| Condição                                                    | $\beta_1$   | $\beta_2$   | $\beta$      |
|-------------------------------------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>ABNT NBR 6118:2014</b>                                   | <b>1,16</b> | <b>0,73</b> | <b>0,847</b> |
| $\beta_1$ do CPV-ARI / $\beta_2$ da NBR 6118                | 1,21        | 0,73        | 0,885        |
| $\beta_1$ do CP “Intermediário” / $\beta_2$ da NBR 6118     | 1,33        | 0,73        | 0,968        |
| $\beta_1$ do CPIV / $\beta_2$ da NBR 6118                   | 1,44        | 0,73        | 1,052        |
| $\beta_1$ do CPV-ARI / $\beta_2$ da máximo - Rusch (1960)   | 1,21        | 0,75        | 0,909        |
| $\beta_1$ do CP Inter. / $\beta_2$ da máximo - Rusch (1960) | 1,33        | 0,75        | 0,995        |
| $\beta_1$ do CPIV / $\beta_2$ da máximo - Rusch (1960)      | 1,44        | 0,75        | 1,081        |

Para a verificação da segurança no caso em estudo, calculou-se a resistência à compressão de projeto do concreto  $f_{cd}$ , de acordo com a equação 4, utilizando os coeficientes calculados na tabela 5. Os resultados estão expressos na Tabela 6.

$$f_{cd} = \beta * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (4)$$

Tabela 6. Tensão à compressão do concreto

| Condição                                                    | $f_c$ (MPa) | $\gamma_c$ | $\beta$      | $f_{cd}$ (MPa) |
|-------------------------------------------------------------|-------------|------------|--------------|----------------|
| <b>ABNT NBR 6118:2014 (valor referência)</b>                | <b>40</b>   | <b>1,4</b> | <b>0,847</b> | <b>24,2</b>    |
| $\beta_1$ do CPV-ARI / $\beta_2$ da NBR 6118                | 37,1        | 1,4        | 0,885        | 23,4           |
| $\beta_1$ do CP “Intermediário” / $\beta_2$ da NBR 6118     |             |            | 0,968        | 25,7           |
| $\beta_1$ do CPIV / $\beta_2$ da NBR 6118                   |             |            | 1,052        | 27,9           |
| $\beta_1$ do CPV-ARI / $\beta_2$ da máximo - Rusch (1960)   |             |            | 0,909        | 24,1           |
| $\beta_1$ do CP Inter. / $\beta_2$ da máximo - Rusch (1960) |             |            | 0,995        | 26,4           |
| $\beta_1$ do CPIV / $\beta_2$ da máximo - Rusch (1960)      |             |            | 1,081        | 28,6           |
| $\beta_1$ do CPV-ARI / $\beta_2$ da NBR 6118                | 37,4        | 1,4        | 0,885        | 23,6           |
| $\beta_1$ do CP “Intermediário” / $\beta_2$ da NBR 6118     |             |            | 0,968        | 25,9           |
| $\beta_1$ do CPIV / $\beta_2$ da NBR 6118                   |             |            | 1,052        | 28,1           |
| $\beta_1$ do CPV-ARI / $\beta_2$ da máximo - Rusch (1960)   |             |            | 0,909        | 24,3           |
| $\beta_1$ do CP Inter. / $\beta_2$ da máximo - Rusch (1960) |             |            | 0,995        | 26,6           |
| $\beta_1$ do CPIV / $\beta_2$ da máximo - Rusch (1960)      |             |            | 1,081        | 28,9           |
| $\beta_1$ do CPV-ARI / $\beta_2$ da NBR 6118                | 38,6        | 1,4        | 0,885        | 24,4           |
| $\beta_1$ do CP “Intermediário” / $\beta_2$ da NBR 6118     |             |            | 0,968        | 26,7           |
| $\beta_1$ do CPIV / $\beta_2$ da NBR 6118                   |             |            | 1,052        | 29,0           |
| $\beta_1$ do CPV-ARI / $\beta_2$ da máximo - Rusch (1960)   |             |            | 0,909        | 25,1           |
| $\beta_1$ do CP Inter. / $\beta_2$ da máximo - Rusch (1960) |             |            | 0,995        | 27,4           |
| $\beta_1$ do CPIV / $\beta_2$ da máximo - Rusch (1960)      |             |            | 1,081        | 29,8           |

Os valores obtidos demonstram que apenas quando se considera exclusivamente o cimento CPV ARI que a tensão obtida se apresenta abaixo do esperado. Para os concretos com cimento com pozolana, como é o caso deste estudo, a tensão de cálculo do concreto já se apresenta acima do exigido. Verifica-se uma natureza conservadora da ABNT NBR 6118:2014 – característica esperada de normas técnicas. Entretanto, surge a possibilidade de o profissional usar conhecimentos consolidados no meio e avançar no estudo do crescimento da resistência do concreto após os 28 dias.

Ressalta-se que, segundo a ABNT NBR 6118:2014, caso as resistências continuassem abaixo do  $f_{ck}$  de projeto, deveria ser realizado novo cálculo estrutural com o novo valor. Ainda permanecendo a insegurança deveria ser previsto uma limitação de uso do elemento, elaboração de projeto de reforço ou até a demolição parcial ou total das peças não conformes.

#### 4. CONCLUSÕES

Ao analisar o comportamento da resistência à compressão ao longo do tempo, bem como verificar as recomendações de normativas internacionais e os demais intervenientes no controle tecnológico do concreto observa-se que as prescrições estabelecidas na ABNT NBR 6118:2014 são conservadoras, conduzindo a um alto grau de segurança, como é o esperado em normas técnicas.

Entretanto, alguns dos critérios estabelecidos pela norma não levam em consideração importantes fatores, principalmente no que se refere à resistência do concreto ao longo do tempo, como observado no estudo de caso apresentado. A referida normativa não considera o real comportamento do material, visto que desconsidera o efeito das adições pozolânicas neste crescimento, além de considerar um decréscimo de resistência (*efeito Rüs*) superior ao apontado por Rüs (1960) (Helene, 2011; Silva Filho, Helene, 2011). Tais fatores podem afetar, diretamente, o fator de ponderação  $\beta$ , que afeta o cálculo estrutural.



Ressalta-se que antes da utilização de novos coeficientes, devem ser realizadas outras etapas, como a revisão do cálculo estrutural e a realização de uma rigorosa inspeção, aferindo o rigor da execução, a geometria e a qualidade dos materiais. Estas etapas, somada à estimativa do desempenho frente os efeitos de longa duração, podem auxiliar na verificação da segurança e na tomada de decisão em casos de não conformidade em concretos estruturais.

## 5. REFERÊNCIAS

- American Concrete Institute (2011), “*ACI 318-11: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*”, (Detroit, Michigan, USA: ACI), p.503.
- American Concrete Institute (2011), “*ACI 214R-11: Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete*”, (Detroit, Michigan, USA: ACI), p.16.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2015), “*NBR 12655: Concreto: Controle, preparo e recebimento*”, (Rio de Janeiro,Brasil:ABNT), p.23.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2015), “*NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*”, (Rio de Janeiro,Brasil:ABNT), p.238.
- Caspeele, R., Taerwe, L. (2011), “*Statistical comparison of data from concrete families in ready-mixed concrete plants*”, *Structural Concrete*, V. 12(3), pp.148-154.
- Caspeele, R., Taerwe, L. (2014), “*Influence of concrete strength estimation on the structural safety assessment of existing structures*”, *Construction and Building Materials*, V.62, pp.77-84.
- Comite Euro-International du Beton (1993), “*Model Code 1990: Design Code*”, (Lausanne, Suíça: Thomas Telford Services Ltd), p.437.
- Comite Euro-International du Beton (2012), “*fib Model Code 2010: Final Draft Vol 1*”, (Lausanne, Suíça; FIB), p.311.
- Couto, D., Carvalho, M., Cintra, A., Helene, P. (2015), “*Concrete structures. Contribution to the safety assessment of existing structures*”, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, V. 8(3), pp.365-389.
- British Standards European Standard (2013), “*Concrete. Specification, performance, production and conformity*”, (BSI), p.98.
- Helene, P. (2011), “*Análise da resistência à compressão do concreto em estruturas acabadas com vistas à revisão da segurança estrutural*”, *Revista ALCONPAT*. V. 1(1), pp.67-92.
- Helene, P., Terzian, P. (1992), “*Manual de dosagem e controle do concreto*”, (São Paulo,Brasil: PINI), p.349.
- Kausay, T., Simon, T. K. (2007), “*Acceptance of Concrete Compressive Strength*”, *Concrete Structures*, V.8, pp.54-63.
- Klemczak, B., Batog, M., Pilch, M. (2016), “*Assessment of concrete strength development models with regard to concretes with low clinker cements*”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, V. 16(2), pp.235-247.
- Larrossa, M. C., Real, M. V., Dias, C. R. R., Magalhães, F. C. (2014), “*Statistical analysis and conformity testing of concrete in port construction work*”, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, V.7(3), pp.468-497.
- Magalhães, F. C., Real, M. V., Silva Filho, L. C. P. (2014), “*The problem of non-compliant concrete and its influence on the reliability of reinforced concrete columns*”, *Materials and Structures*, pp.1-13.
- Magalhães, F. C. (2014), “*A problemática dos concretos não conformes e sua influência na confiabilidade de pilares de concreto armado*”, *Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, p.290.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. (2014), “*Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*”, (São Paulo: IBRACON), p.782.
- Pereira, M. D. S. (2008), “*Controle da resistência do concreto: paradigmas e variabilidades: estudo de caso*”, *Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília*, p.229.

- Pacheco, J., Helene, P. (2013), "*Boletín Técnico nº 9: Controle da resistência do concreto*", (Mérida, México: ALCONPAT Internacional), p.20.
- Rao, K. B., Anoop, M. B., Iyer, N. R. (2013), "*Producer's Risk Associated with Concrete Compressive Strength Acceptance Criteria of IS456-2000*", Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, V.94(4), pp.243-249.
- Santiago, W. C. (2011), "*Estudo da (Não-) Conformidade de concretos produzidos no Brasil e sua influência na confiabilidade estrutural*", Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, p.107.
- Santiago, W. C., Beck, A. T. (2011), "*A study of Brazilian concrete strength (non-) compliance and its effects on reliability of short columns*", Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, V. 4(4), pp.663-690.
- Silva Filho, L. C. P., Helene, P. (2011), "*Análise de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência e Fissuração*", In: Geraldo C. Isaia. (Org.), Concreto: Ciência e Tecnologia (São Paulo:IBRACON), pp.1129-1174