

# Influence of the placement rate on the fresh concrete lateral pressure in the design of formworks

## *Influência da velocidade de concretagem sobre a pressão lateral do concreto fresco no dimensionamento de fôrmas*



M. O. SOUSA <sup>a</sup>  
sousa.marinaeng@gmail.com

N. S. SANTOS <sup>a</sup>  
naianeengcivil@gmail.com

R. L. PEREIRA <sup>a, b</sup>  
robsonlopesvetor@gmail.com

P. C. R. MARTINS <sup>b</sup>  
profpaulochaves@gmail.com

L. J. PEDROSO <sup>b</sup>  
lineujp@gmail.com

### Abstract

The fresh concrete lateral pressure generates a load that has great influence in the design of the formworks of columns, walls and lateral faces of the beams. Its prediction must be performed in such a way in order to approach precisely well over the rate values supported by the formworks, avoiding, therefore, the oversizing or undersizing of these temporary structures which represent up to 12% of the total cost of the construction. The calculation of the lateral pressure that fresh concrete exerts on the formworks involves several variables; one of them is the placement rate. The main objective of this work was to study the influence of the placement rate, in situ, on the lateral pressure of fresh concrete calculated from theoretical models presented by norms and international references. For this purpose, measurements of the placement rate were conducted on columns of five building work places at Goiânia city, Goiás, Brazil and it was calculated the maximum pressure supported by their respective formworks from the dimensions and spans between the supports of the components that constituted them. The obtained results indicate that the placement rate in the field observations reach 249 m/h, exceeding the values limited by the theoretical methods of calculation, and that the lateral pressure estimation produced from the placement rate measured in situ exceed the maximum values supported by the formworks up to 604 times. Thus, it was concluded that it is necessary to adjust equations to estimate the lateral pressure of fresh concrete at high rate of concrete placement, according to the current practices in the construction market.

**Keywords:** lateral pressure, formworks, columns, placement rate.

### Resumo

A pressão lateral do concreto fresco gera uma carga que possui grande influência no dimensionamento das fôrmas de pilares, paredes e faces laterais das vigas. Sua previsão deve ser realizada de modo que se aproxime bem dos valores suportados pelas fôrmas, evitando-se, assim, o superdimensionamento ou subdimensionamento dessas estruturas provisórias que representam até 12% do custo total da obra. O cálculo da pressão lateral que o concreto fresco exerce sobre as fôrmas envolve diversas variáveis, sendo uma delas a velocidade de concretagem. O principal objetivo deste trabalho foi estudar a influência da velocidade de concretagem sobre a pressão lateral do concreto fresco calculada a partir de modelos teóricos apresentados por normas e referências internacionais. Para isso, foram realizadas medições da velocidade de concretagem em pilares de cinco obras de Goiânia e calculadas as pressões máximas suportadas por suas respectivas fôrmas, a partir das dimensões e dos vãos entre os apoios dos elementos que as constituíam. Os resultados obtidos apontam que as velocidades de concretagem em campo chegam a 248,57 m/h, superando os valores limitados pelos métodos teóricos de cálculo, e que as estimativas da pressão realizadas a partir das velocidades medidas in loco ultrapassam os valores máximos suportados pelas fôrmas em até 603,75 vezes. Assim, concluiu-se que é necessária a formulação de equações para estimar a pressão lateral do concreto fresco a altas velocidades de concretagem, conforme as atuais práticas no mercado da construção civil.

**Palavras-chave:** pressão lateral, fôrmas para concreto, pilar, velocidade de concretagem.

<sup>a</sup> Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola de Engenharia, Goiânia, GO, Brasil;  
<sup>b</sup> Universidade de Brasília, PECC-UnB, Brasília, DF, Brasil.

## 1. Introdução

O concreto armado é um dos materiais mais utilizados na construção civil, sendo, atualmente, um dos mais importantes deste ramo da engenharia. Para sua aplicação faz-se necessária a utilização das fôrmas e escoramentos, que, segundo Freitas [1], têm a função de garantir a geometria, o prumo, o nível e o alinhamento do elemento estrutural a ser executado.

Apesar da importância das fôrmas e escoramentos, há, segundo Rezende [2], um equivocado descaso com este sistema estrutural provisório, ocorrendo, em determinadas situações, falta de projeto específico e até mesmo ausência de engenheiro na execução do projeto. Para Nazar [3], o estudo detalhado, o dimensionamento e a escolha correta dos materiais das fôrmas e escoramentos são justificados por sua importância na concepção, na execução e nos custos da estrutura de um edifício. Para edifícios habitacionais e comerciais com múltiplos pavimentos, o prazo para a execução das fôrmas e escoramentos pode variar entre 50% e 60% do prazo total da obra. Maranhão [4] afirma que o custo das fôrmas contribui com cerca de 40% a 60% do custo total da estrutura de concreto armado, sendo este, em números aproximados, um item que responde entre 8% e 12% do custo de uma edificação.

De acordo com Barnes e Johnston [5] e Maranhão [4], a previsão da pressão lateral do concreto fresco deve ser feita para o dimensionamento das fôrmas verticais (pilares, paredes e vigas com faces alinhadas verticalmente), de modo a garantir a segurança e minimizar os custos.

Maranhão [4] afirma que são muitas as variáveis que exercem influência sobre a magnitude da pressão lateral do concreto fresco, em função disso, estudos e ensaios realizados para a determinação de uma expressão adequada para o problema diferem-se bastante quanto aos resultados.

A velocidade de concretagem é uma das variáveis que exercem maior efeito sobre a pressão lateral do concreto fresco. Zahng *et*

*al.* [6], em seu estudo experimental com concretos convencionais (adensados por vibração), obtiveram resultados que confirmam o que é proposto por diversos métodos de cálculo: a velocidade de concretagem afeta significativamente a pressão lateral e que quanto maior for o valor dessa variável, maior será a pressão exercida pelo concreto. Santilli *et al.* [7] observaram, em seu estudo, que a velocidade de concretagem e a temperatura são fundamentais para estimar a pressão lateral do concreto fresco, visto que, estas variáveis aparecem de forma implícita ou explícita em todas as equações, das oito teorias que estudaram.

Para Leemann *et al.* [8], velocidades de concretagem cada vez mais altas são utilizadas para reduzir os períodos de construção, esperando-se, comumente, que superem 10 m/h. Porém, os atuais modelos de cálculo da pressão dos concretos convencionais foram desenvolvidos principalmente para menores velocidades de concretagem, sendo necessário determinar uma equação adequada para estimar a máxima pressão lateral do concreto fresco lançado a altas velocidades.

Dentre os métodos de cálculo da pressão lateral do concreto fresco encontram-se os modelos propostos pelo American Concrete Institute (ACI), Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que serão estudados neste trabalho.

Este trabalho teve como principal objetivo o estudo da velocidade de concretagem como um fator que influencia a pressão lateral do concreto fresco nas fôrmas. Foi verificado se as velocidades de concretagem praticadas em obras de Goiânia são representativas dos valores limitados pelos métodos de cálculo ACI 347 R-04, CIRIA R 108 e ABNT NBR 15696:2009 e se as pressões calculadas por meio dos métodos ACI 347 R-04, CIRIA R 108 e ABNT NBR 15696:2009, a partir das velocidades de concretagem aferidas *in loco*, aproximam-se das máximas pressões suportadas pelas fôrmas dos pilares.

### 1.1 Justificativa

O cálculo da pressão lateral de concreto fresco é de grande importância para o projeto de fôrmas e escoramentos, visto que, para fôrmas verticais, principalmente pilares e paredes, a carga que resulta dessa tensão tem grande influência no dimensionamento, que interfere diretamente sobre o quantitativo de material e, conseqüentemente, nos custos da estrutura de concreto. A literatura apresenta a velocidade de concretagem como uma das variáveis que mais impactam no resultado do cálculo da pressão lateral do concreto fresco, devendo ser limitada a um determinado valor, conforme indicado por alguns métodos, não condizendo, muitas vezes com a realidade das obras na atualidade. Além disso, antes da ABNT NBR 15696:2009 não havia, no Brasil, outra diretriz normativa para projetos de fôrmas e escoramentos, sendo esta, portanto, ainda, pouco analisada no meio da Engenharia.

## 2. Pressão lateral do concreto fresco

A NBR 15696 [9] define pressão lateral do concreto fresco como a pressão horizontal que o concreto exerce na face da fôrma que se encontra em contato com o mesmo.

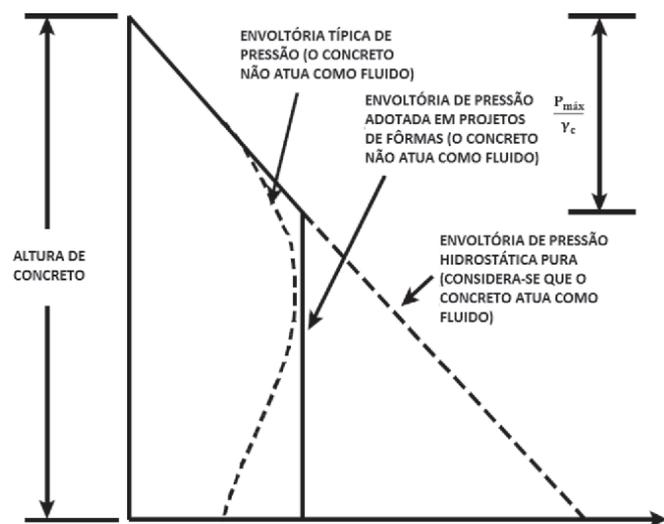


Figura 1  
Envoltórias de pressão lateral do concreto fresco

Fonte: Adaptado de Barnes e Johnston [5]

Barnes e Johnston [5] afirmam que a pressão do concreto fresco exercida sobre as fôrmas é muitas vezes inferior à pressão hidrostática, que considera o concreto como um fluido de peso específico de aproximadamente 24 kN/m<sup>3</sup>, e à pressão calculada para o dimensionamento de fôrmas, como mostrado na Figura 1.

De acordo com Barnes e Johnston [5], são vários fatores que afetam a magnitude da pressão lateral do concreto fresco, incluindo o endurecimento do concreto, procedimento de concretagem e atrito interno entre componentes granulares do concreto e destes com as faces internas das fôrmas, o que torna difícil a determinação de uma expressão que represente a envoltória típica de pressão do concreto fresco, ou seja, a curva da real distribuição da pressão lateral, representada na Figura 1. Para simplificação deste problema, a maioria dos métodos de projeto de fôrmas caracteriza a pressão como hidrostática até certa distância abaixo da superfície livre de concreto e admitem que, a partir deste ponto, permanece constante, até a base da fôrma, no valor máximo estimado por meio do modelo de cálculo, conforme apresentado na Figura 1.

A velocidade de concretagem ou de enchimento (m/h) é uma das variáveis na determinação da pressão lateral do concreto fresco, sendo este fator, conforme a NBR 15696 [9], “o incremento vertical do nível superior do concreto medido linearmente em relação ao tempo decorrido de concretagem”.

Cauberg *et al.* [10], para apresentar os valores obtidos em seu estudo experimental de pressão lateral do concreto fresco, exemplificam: uma velocidade de concretagem de 10 m/h implica no enchimento da fôrma de um pilar de 4 m em 24 minutos e uma taxa de 5 m/h requer, para o mesmo pilar, o dobro do tempo.

Maranhão [4] apresentou, em seu trabalho, os resultados dos estudos realizados pelo Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, que apontam a velocidade de concretagem e a consistência do concreto como os parâmetros que têm influenciado mais sensivelmente o valor da pressão lateral do concreto fresco.

Já Billberg *et al.* [11], a partir da aferição da pressão lateral do concreto fresco em campo, chegaram à conclusão de que, para o caso de concreto autoadensável, outros fatores podem ser mais relevantes do que a velocidade de concretagem, devido à pouca correlação entre este parâmetro e a máxima pressão lateral relativa (razão entre pressão medida e a pressão hidrostática). A falta de correlação entre a pressão e a velocidade de concretagem evidencia que o comportamento estrutural do concreto autoadensável em repouso deve ser considerado na previsão da pressão lateral sobre as fôrmas.

## 2.1 Modelos teóricos para cálculo da pressão lateral do concreto fresco

### 2.1.1 ACI 347 R-04

As equações do ACI 347 R-04 [12] para determinação da máxima pressão lateral do concreto fresco ( $P_{max}$ ) são válidas para concretos com *slump* de no máximo 175 mm, adensados com vibração interna normal a uma profundidade de 1,2 m ou menos.

Para todos os tipos de pilares e para paredes com velocidade de concretagem menor do que 2,1 m/h e altura de lançamento

do concreto (h) que não exceda 4,2 m,  $P_{max}$  (kPa) é dada pela equação (1).

$$P_{max} = C_w C_c \left[ 7,2 + \frac{785R}{T + 17,8} \right] \quad (1)$$

onde  $C_w$  é o coeficiente de correção de peso específico,  $C_c$ , o coeficiente de composição química e aditivos do concreto, R, a velocidade de concretagem em m/h e T, a temperatura do concreto em °C.

Para paredes com  $R < 2,1$  m/h e  $h > 4,2$  m e todas as paredes com  $2,1$  m/h  $< R < 4,5$  m/h,  $P_{max}$  (kPa) é prevista a partir da equação (2).

$$P_{max} = C_w C_c \left[ 7,2 + \frac{1156}{T + 17,8} + \frac{224R}{T + 17,8} \right] \quad (2)$$

Para as equações (1) e (2),  $30 C_w \leq P_{max} \leq \rho g h$ .

### 2.1.2 CIRIA R 108

O relatório CIRIA R 108, fornece orientação para o cálculo das pressões laterais do concreto fresco exercidas sobre as fôrmas. De acordo com Waarde [13], a máxima pressão ( $P_{max}$ ), em kPa, que o concreto fresco exerce sobre as fôrmas, determinada a partir do método CIRIA R 108, é calculada a partir das equações (3) e (4), devendo ser tomado, para o projeto, o menor entre os dois valores obtidos.

$$P_{max} = \gamma_c \left[ C_1 \sqrt{v} + C_2 K \sqrt{H - C_1 \sqrt{v}} \right] \quad (3)$$

$$P_{max} = \gamma_c \cdot h \quad (4)$$

onde  $\gamma_c$  é o peso específico do concreto (kN/m<sup>3</sup>),  $C_1$  é o coeficiente que depende do tamanho e da forma da fôrma (1 para paredes e 1,5 para pilares),  $C_2$  é o coeficiente que depende dos materiais constituintes do concreto,  $v$  é a velocidade de concretagem em m/h, K é o coeficiente de temperatura, H é a altura da fôrma em m e h, a altura de lançamento do concreto em m.

O coeficiente K é calculado através da equação (5).

$$K = \left( \frac{36}{T + 16} \right)^2 \quad (5)$$

com T igual à temperatura do concreto em °C.

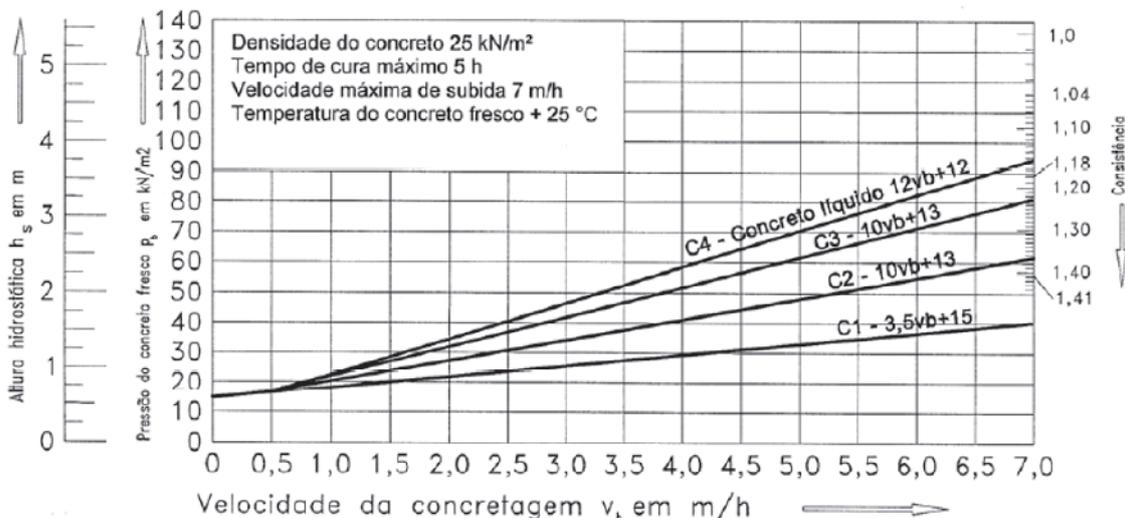
Ressalta-se que o método CIRIA R 108 não impõe um valor limite para velocidade de concretagem, sendo que quando  $C_1 \sqrt{v} > H$ , a equação (4) deve ser adotada como pressão de projeto, conforme descrito por Waarde [13].

**Tabela 1**

Classes de consistência do concreto

| Classe de consistência | Abatimento (mm)       |
|------------------------|-----------------------|
| C1                     | abatimento ≤ 20       |
| C2                     | 20 < abatimento ≤ 80  |
| C3                     | 80 < abatimento ≤ 140 |
| C4                     | abatimento > 140      |

Fonte: NBR 15696 [9]



**Figura 2**

Diagrama para determinação da pressão lateral do concreto fresco e altura hidrostática correspondente, em função da velocidade da concretagem e da consistência

Fonte: NBR 15696 [9]

**2.1.3 NBR 15696 (ABNT, 2009)**

O cálculo da máxima pressão lateral do concreto fresco proposto pela NBR 15696 [9] é feito para diferentes classes de consistência do concreto, determinadas conforme a Tabela 1.

De acordo com a NBR 15696 [9] a altura hidrostática, representada por  $P_{max} / \gamma_c$  na Figura 1, “é a diferença entre a superfície superior do concreto fluido e a altura, onde a pressão do concreto fluido atinge o valor máximo”.

A máxima pressão lateral do concreto fresco ( $P_b$ ), em kN/m<sup>2</sup>, e a altura hidrostática correspondente ( $h_s$ ), em metros, são calculadas em função da velocidade de concretagem ( $v_b$ ), em m/h, e da classe de consistência do concreto, através do diagrama apresentado na Figura 2.

Quando forem utilizados aditivos retardadores, os valores da pres-

são do concreto e a altura hidrostática, extraídos do diagrama, devem ser multiplicados por fatores de majoração, que dependem da classe de consistência do concreto e do tempo de retardamento da pega, em horas.

No caso de concretos autoadensáveis, devido à sua alta fluidez, deve-se considerar a pressão do concreto como sendo hidrostática, durante o tempo de endurecimento ou início de pega, dependendo do método de concretagem.

Se o peso específico do concreto ( $\gamma_c$ ) diferir de 25 kN/m<sup>3</sup>, o valor da pressão de concreto deve ser multiplicado pelo fator  $\alpha$ , que varia conforme o valor de  $\gamma_c$ . A altura hidrostática permanece igual, independentemente das alterações do peso específico.

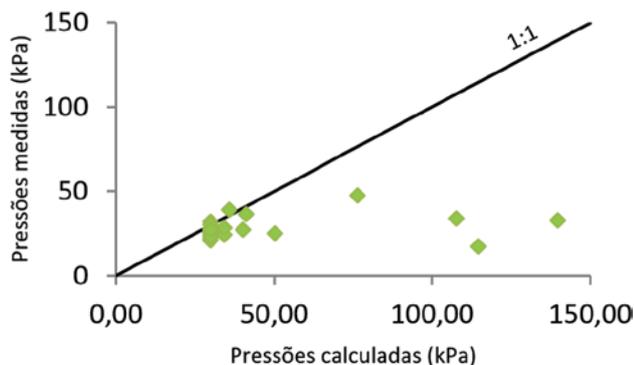
Se não houver medidas de isolamento térmico, a influência da temperatura deve ser considerada. Nos casos em que a temperatura do concreto, durante a concretagem, for menor que 25°C,  $P_b$  e  $h_s$  devem ser aumentados em 3% para cada 1°C abaixo de 25°C. Não é permitido considerar a influência de temperaturas acima de 25 °C.

**2.2 Análise dos métodos teóricos de cálculo da pressão lateral do concreto fresco**

As análises dos métodos de cálculo ACI 347 R-04, CIRIA R 108 e ABNT NBR 15696:2009 foram realizadas comparando-se a pressão lateral do concreto fresco estimada por meio destes modelos aos valores experimentais apresentados pelos seguintes autores: Arslan [14], Arslan *et al.* [15], Maranhão [4], O’Janpa III [16] e Zhang *et al.* [6]. Além das pressões laterais do concreto fresco medidas experimentalmente, foram coletadas todas as variáveis de cálculo, também aferidas pelos autores.

Foram gerados gráficos das pressões calculadas *versus* as medidas experimentalmente para os três métodos estudados.

Os dados experimentais fornecidos por Maranhão [4] e O’Janpa III [16] não foram lançados nos gráficos porque as velocidades de



**Figura 3**

Pressões calculadas com ACI 347 R-04 *versus* pressões medidas para velocidades de concretagem entre 0,45 e 6,38 m/h

Fonte: elaborada pelos autores

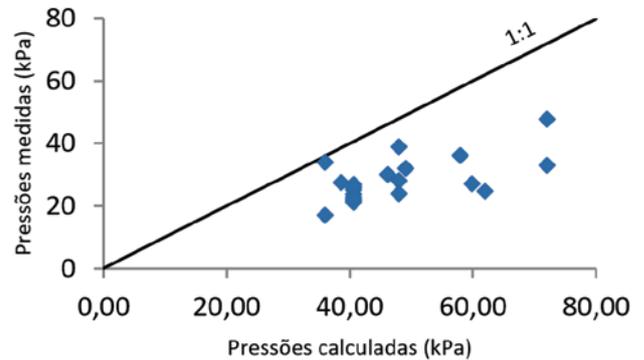
concretagem verificadas por esses autores ultrapassaram os limites determinados pelas normas ACI 347 R-04 (4,5 m/h para paredes) e ABNT NBR 15696:2009 (7 m/h), fazendo com que as pressões calculadas fossem superiores às medidas, de modo a impossibilitar a análise gráfica dos métodos.

Os gráficos das pressões calculadas *versus* pressões medidas experimentalmente, são apresentados, para cada método, nas Figuras 3, 4 e 5. Todos apresentam uma reta de inclinação 1:1, que representa a posição onde as pressões medidas são iguais às pressões calculadas. Os dados experimentais de pressão foram obtidos com velocidades de concretagem que variaram de 0,45 a 6,38 m/h, sendo estas utilizadas nos cálculos.

Observa-se pelo gráfico da Figura 3 que para o método ACI 347 R-04 os pontos, dados pelos pares ordenados de pressões calculadas e pressões medidas, ficaram, em sua maioria, posicionados sobre ou abaixo da reta 1:1. Isto significa que este modelo conduziu a valores de pressões calculadas aproximadamente iguais ou superiores às reais pressões do concreto exercidas sobre as fôrmas. Para dois pontos, excepcionalmente, as pressões foram subestimadas: no primeiro caso a pressão medida foi igual a 32,00 kPa e a calculada 30,00 kPa e no segundo, a pressão medida foi de 39,00 kPa e a calculada 35,80 kPa. No ponto mais à direita do gráfico, a velocidade de concretagem foi de 6,38 m/h, a pressão medida foi 33,00 kPa e a calculada 139,69 kPa, sendo esta diferença de 223,32%. Para o ponto abaixo e mais afastado da reta, a velocidade de concretagem foi igual a 5,17 m/h, a pressão medida foi de 17,10 kPa e a calculada 114,57 kPa, significando que os valores de pressão superestimados (pontos sob a reta 1:1) superaram em até 469,98% os valores medidos.

No gráfico da Figura 4, nota-se que todos os pontos situam-se abaixo da reta 1:1, logo o método CIRIA R 108 conduziu a resultados de pressões calculadas, em sua totalidade, superiores aos de pressões medidas. Para o ponto mais afastado e abaixo da reta 1:1 o valor medido foi de 24,80 kPa e o calculado 61,98 kPa, significando que os valores de pressão superestimados superaram em até 49,92% os valores medidos, com a velocidade de concretagem igual a 1,97 m/h. Nos dois pontos mais à direita do gráfico, a pressão calculada foi 72,00 kPa e as medidas foram 33,00 kPa e 47,70 kPa, com velocidades de concretagem de 6,38 e 2,36 m/h e diferenças de 18,18% e 49,06%, respectivamente. Nota-se que para diferentes velocidades de concretagem, a pressão calculada resultou em um mesmo valor. Isso ocorreu porque no primeiro caso a pressão foi calculada a partir da equação (3), na qual a velocidade de concretagem é uma variável, e no segundo caso com a equação (4), que depende somente do peso específico e da altura de lançamento do concreto.

Verifica-se pelo gráfico da Figura 5, que o método ABNT NBR 15696:2009 gerou resultados de pressão aproximadamente iguais (pontos em cima da reta 1:1) ou superiores (pontos situados abaixo da reta 1:1) às pressões medidas, mas também conduziu a valores de pressão inferiores aos dados experimentais (pontos acima da reta 1:1). Para o ponto que está posicionado mais abaixo da reta o valor medido foi de 17,10 kPa e o calculado 82,18 kPa, significando que os valores de pressão superestimados superaram em até 280,61% os valores medidos, com a velocidade de concretagem igual a 5,17 m/h. Nos casos em que a pressão foi subestimada, o ponto mais acima da reta foi pressão medida



**Figura 4**

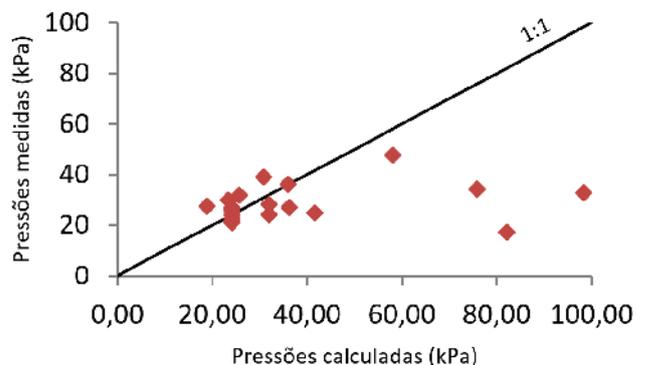
Pressões calculadas com CIRIA R 108 *versus* pressões medidas para velocidade de concretagem entre 0,45 e 6,38 m/h

Fonte: elaborada pelos autores

igual 27,50 kPa e calculada igual a 18,79 kPa. No ponto mais à direita do gráfico, a velocidade de concretagem foi de 6,38 m/h, a pressão medida foi 33,00 kPa e a calculada 98,30 kPa, sendo esta diferença de 97,88%.

Nota-se que, para os três métodos de cálculo da pressão lateral do concreto fresco, a maior velocidade de concretagem gerou o maior valor de pressão calculada, mas não a maior diferença entre pressão medida e calculada, indicando que, além desta, outras variáveis de cálculo, tais como *slump*, peso específico, composição química e temperatura do concreto, também são importantes na estimativa da pressão.

Comparando-se o ACI 347 R-04 aos demais métodos, nota-se que, apesar de alguns resultados superarem em muito os reais valores de pressão exercidos sobre as fôrmas, este pode ser considerado um bom método de estimativa da pressão lateral do concreto fresco, já que, de maneira geral, apresentou uma boa aproximação dos dados experimentais, para uma faixa de velocidade de concretagem de 0,45 a 2,36 m/h. Analisando-se os pontos situados mais abaixo da reta no gráfico da Figura 4, nota-se que



**Figura 5**

Pressões calculadas com ABNT NBR 15696:2009 *versus* pressões medidas para velocidade de concretagem entre 0,45 e 6,38 m/h

Fonte: elaborada pelos autores

**Tabela 2**

Pressões laterais de concreto fresco medidas e calculadas

| Autor            | Forma da seção transversal | Dimensões (cm) | Velocidade de concretagem (m/h) | Pressões medidas (kPa) | Pressões calculadas (kPa) |             |                     |
|------------------|----------------------------|----------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------|-------------|---------------------|
|                  |                            |                |                                 |                        | ACI 347 R-04              | CIRIA R 108 | ABNT NBR 15696:2009 |
| Maranhão [4]     | Pilar                      | 20x100         | 32,00                           | 26,38                  | 565,06                    | 57,60       | 419,58              |
| O'Janpa III [16] | Parede                     | -              | 27,40                           | 2,40                   | 366,52                    | 68,22       | 468,96              |
| O'Janpa III [16] | Parede                     | e=24,13        | 13,00                           | 2,74                   | 174,73                    | 75,04       | 244,27              |
| O'Janpa III [16] | Parede                     | e=24,14        | 12,20                           | 2,45                   | 163,15                    | 68,22       | 225,56              |
| O'Janpa III [16] | Parede                     | e=22,86        | 36,60                           | 1,91                   | 393,80                    | 68,22       | 551,07              |

Fonte: elaborada pelos autores

1) e é a espessura da parede;

2) As velocidades de concretagem foram medidas pelos autores;

3) A concretagem realizada no estudo de Maranhão (2000) foi feita manualmente, utilizando-se gerica, e as demais foram feitas por bombeamento.

o método CIRIA R 108, apesar de ter superestimado a pressão para todos os casos, conduziu, a resultados mais próximos das pressões medidas do que os métodos ACI 347 R-04 e ABNT NBR 15696:2009. Dentre os três métodos analisados, o da ABNT NBR 15696:2009 gerou resultados de menor acurácia.

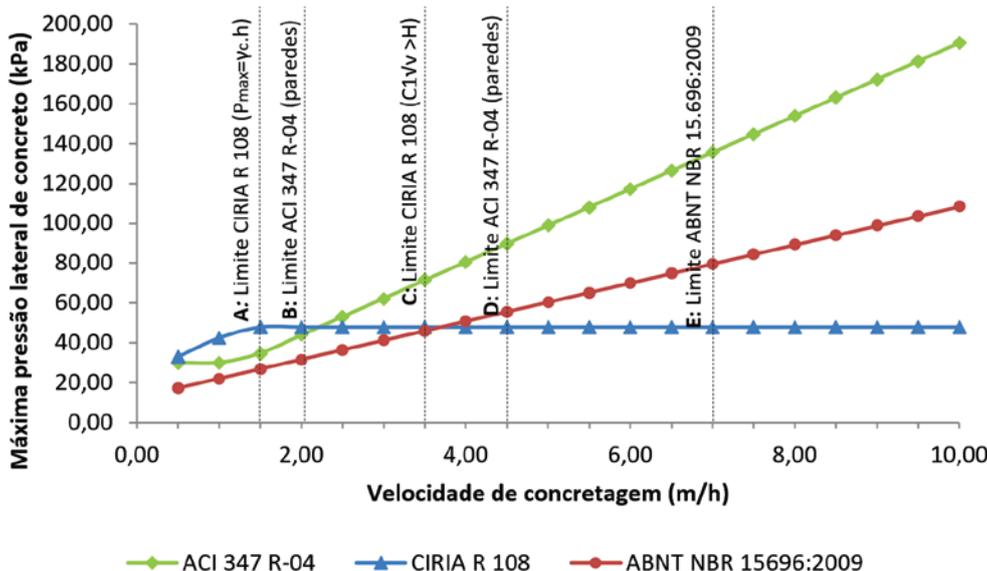
Os dados experimentais obtidos por Maranhão [4] e O'Janpa III [16], bem como os resultados dos cálculos da pressão pelos métodos ACI 347 R-04, CIRIA R 108 e ABNT NBR 15696:2009 para as fôrmas destas pesquisas, constam na Tabela 2.

Nota-se na Tabela 2, que as pressões calculadas a partir dos valores de velocidade de concretagem que ultrapassaram os limites determinados pelos métodos ACI 347 R-04 (até 4,5 m/h para paredes) e ABNT NBR 15696:2009 (até 7,0 m/h) foram muito elevadas. Já o método CIRIA R 108, apesar de ter se apresentado como o mais conservador, conduziu, para os dados apresentados na Ta-

bela 2, a menores valores de pressão em relação aos calculados a partir dos demais modelos. É importante ressaltar que, na Tabela 2, todos os resultados obtidos a partir deste método foram dados pela relação  $P_{max} = \gamma_c \cdot h$ , porque, para os quatro casos,  $C1\sqrt{v}$  foi maior do que H. Observa-se ainda que, apesar de não determinar um valor máximo para a velocidade de concretagem, o método CIRIA R 108 limita esta variável de maneira implícita em função da altura da fôrma (H) e do coeficiente C1.

**2.2.1 Análise da influência da velocidade de concretagem sobre a pressão lateral do concreto fresco calculada através dos métodos teóricos**

A Figura 6 representa o gráfico da pressão calculada versus velocidade de concretagem, que demonstra a influência desta variável



**Figura 6**

Influência da velocidade de concretagem sobre a pressão lateral do concreto fresco calculada a partir de diferentes métodos de cálculo

Fonte: elaborada pelos autores

sobre a pressão lateral do concreto fresco calculada a partir dos métodos ACI 347 R-04, CIRIA R 108 e ABNT NBR 15696:2009. As retas verticais tracejadas (A, B, C, D e E) representam os limites de velocidade de concretagem para cada um destes modelos.

No gráfico da Figura 6, os efeitos de diferentes velocidades de concretagem sobre a pressão lateral do concreto fresco podem ser analisados para um pilar com os seguintes dados estipulados: altura igual a 2,90 m, *slump* do concreto de 120 mm, temperatura do concreto de 25° C, peso específico igual 24 kN/m<sup>3</sup>, cimento ASTM Tipo I ou CEM I (para determinação dos coeficientes de composição química do concreto  $C_c$  e  $C_2$ ), que, respectivamente, segundo Mehta e Monteiro [17] e Waarde [13], correspondem aproximadamente aos cimentos CP II, não possui aditivos retardadores de pega e a altura de lançamento do concreto é de 2,00 m. A velocidade de concretagem variou de 0,5 a 10,0 m/h, a cada 0,5 m/h.

Pelo gráfico da Figura 6, observou-se que a relação entre velocidade de concretagem e pressão lateral do concreto fresco para o método ABNT NBR 15696:2009 é linear e diretamente proporcional. Já o método ACI 347 R-04, apresentou uma relação linear entre velocidade de concretagem e pressão somente a partir de 2,0 m/h. Apesar do fato de este método não limitar a velocidade de concretagem para pilares, nota-se que 2,1 m/h (reta B) é o limite máximo para paredes com altura de lançamento do concreto maior do que 4,2 m e mínimo para os demais casos. Para as velocidades de concretagem acima de 4,5 m/h (reta D) e 7,0 m/h (reta E), que são os máximos valores de velocidade de concretagem determinados pelo ACI 347 R-04, para paredes, e ABNT NBR 15696:2009, não há mudança no comportamento das curvas.

Para o método CIRIA R 108, verificou-se, a partir da Figura 6, que a velocidade de concretagem apresentou-se como diretamente proporcional à pressão lateral de concreto até 1,5 m/h (reta A), mantendo-se constante a partir de 2,0 m/h. Isto ocorreu porque a partir de 2,0 m/h a pressão passou a ser obtida por  $\gamma_c \cdot h$ , que foi o menor valor entre este e o obtido pela equação (3). Desse modo, a velocidade de concretagem foi limitada a 1,5 m/h em função da altura de lançamento do concreto ( $h$ ). Porém, o limite de velocidade de concretagem pela equação (3) foi igual a 3,5 m/h (reta C), obtido em função do coeficiente  $C_1$  igual a 1,5 (a forma da seção transversal é um pilar) e da altura do pilar ( $H$ ) igual a 2,90 m. Portanto, para este método, a velocidade de concretagem não influencia no resultado da pressão exercida pelo concreto a partir do seu valor limite, que corresponde à velocidade de concretagem em que  $\gamma_c \cdot h$  passa a ser igual ao máximo valor de pressão ou ao ponto em que  $C_1 \sqrt{v} > H$ .

Comparando-se os três modelos teóricos de cálculo a partir do gráfico da Figura 6, nota-se que para método CIRIA R 108 a velocidade de concretagem apresentou maior impacto sobre o valor da pressão até 2,0 m/h, sendo que, a partir desse ponto a velocidade passou a ter maior influência sobre o valor de pressão calculado por meio do ACI 347 R-04. A partir de 4,0 m/h, a velocidade de concretagem exerceu maior influência sobre pressão calculada a partir do método ABNT NBR 15696:2009, do que a obtida pelo CIRIA R 108.

### 2.3 Dimensionamento de fôrmas de pilares

O dimensionamento das fôrmas de pilares, recomendado no Manual SH de fôrmas para concreto, SH [18], é feito analisando-se

cada um dos elementos componentes das fôrmas de pilares: o molde (madeira ou compensado), a estruturação (sarrafos de madeira ou perfis metálicos) e o travamento (madeira ou perfis metálicos com barras de ancoragem fixadas com porcas).

A Figura 7 apresenta uma fôrma de pilar com seus respectivos elementos: molde de compensado plastificado com 18 mm de espessura, sarrafos de estruturação de madeira 6x6 cm e travamento com perfil metálico C-75.

De acordo com a SH [18], o dimensionamento das fôrmas de pilares deve ser realizado considerando-se que as peças de estruturação do painel e os travamentos são elementos biapoiados, devendo-se limitar os vãos a partir do cálculo da flecha ( $L/300$  mm) e do momento admissível de cada peça.

Já a NBR 15696 [9] determina que os cálculos de dimensionamento de fôrmas e escoramentos devem ser feitos pelo método dos estados-limites. O método de tensões admissíveis pode ser aplicado, porém, em caráter transitório, sendo que o fator de segurança utilizado deve assegurar o atendimento das mesmas condições dos estados-limites. Embora as fôrmas e escoramentos sejam estruturas de caráter provisório, as combinações de ações a serem consideradas devem ser de construções normais, com todas as cargas tomadas como variáveis.

## 3. Metodologia

A pesquisa consistiu em medir as velocidades de concretagem de pilares *in loco* e determinar a pressão máxima suportada pelas fôrmas dos mesmos.



**Figura 7**  
Elementos constituintes de uma fôrma de pilar

Fonte: elaborada pelos autores

**Tabela 3**

Características das obras e dos pilares estudados

| Obra | Tipo de empreendimento | Método de concretagem | Seção transversal do pilar (cm) | Forma da seção transversal | Projeto de fôrmas |
|------|------------------------|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------|
| A    | Institucional          | Pilar solteiro        | 30 x 50                         | Pilar                      | Não               |
| B    | Residencial            | Pavimento integrado   | 20 x 130                        | Pilar                      | Não               |
| C    | Comercial              | Pilar solteiro        | 35 x 80                         | Pilar                      | Não               |
| D    | Residencial            | Pavimento integrado   | 35 x 15                         | Pilar                      | Sim               |
| E    | Residencial            | Pilar solteiro        | 19 x 695 <sup>(1)</sup>         | Parede                     | Sim               |

**Fonte:** elaborada pelos autores  
 1) Pilar em seção "U" com dimensões de 256 x 19+183 x 19+256 x 19 cm;  
 2) Todas as concretagens acompanhadas foram realizadas por meio do uso de bomba para lançamento do concreto;  
 3) Em todas as obras o concreto foi produzido com cimento CP II.

### 3.1 Medição da velocidade de concretagem em campo

Foram realizadas medições das velocidades de concretagem em cinco obras de Goiânia, sendo que, para cada uma, aferiu-se a velocidade de concretagem em um único pilar, cujas características são descritas na Tabela 3.

Em duas das obras foi adotada a concretagem de pavimento integrado, método no qual as lajes, as vigas e os pilares que as suportam são concretados simultaneamente. As demais adotaram o sistema de pilares solteiros, que consiste na execução somente dos pilares e posteriormente das lajes e vigas. Somente duas das obras possuíam projetos de fôrmas e escoramentos.

Para medir as velocidades de concretagem foram adotados três métodos: o da Associação Brasileira de Fôrmas, Escoramentos e Acesso (ABRASFE) [19] e as medições em camadas e direta.

Além da medição da velocidade de concretagem, foi realizado o cálculo da pressão máxima suportada pelas fôrmas dos pilares estudados, a partir das propriedades estimadas e da configuração dos elementos constituintes da estruturação dos painéis, segundo os métodos SH [18] e NBR 15696 [9].

Para medição da velocidade de concretagem pelo método da ABRASFE, determinou-se, inicialmente, a vazão da bomba. Para isso mediu-se, com auxílio de um cronômetro, o tempo necessário

ao total esvaziamento do caminhão de concreto, descontando-se, portanto, as pausas do bombeamento. A partir da vazão da bomba e do volume do pilar, determinou-se o tempo de enchimento do pilar. Com o tempo de enchimento e a altura do pilar, calculou-se a velocidade de concretagem.

Na medição em camadas, seguindo a metodologia de Billberg *et al.* [11], foram utilizados trena e cronômetro. Mediu-se, para cada camada de concreto lançada nas fôrmas dos pilares, a profundidade da superfície livre de concreto e o tempo decorrido até que o concreto atingisse esse nível. O número de camadas foi igual ao necessário ao total enchimento do pilar, variando, portanto, para cada obra. Para cada camada obteve-se um valor de velocidade de concretagem. Como resultado final, adotou-se, o maior valor.

Para medir a velocidade de concretagem diretamente, obteve-se o tempo necessário ao total do enchimento do pilar, através de cronômetro.

### 3.2 Pressão máxima suportada pelas fôrmas

A máxima pressão suportada pelas fôrmas dos pilares estudados foi calculada pelos métodos da SH [18] e da NBR 15696 [9] a partir da configuração das fôrmas *in loco*. Para isso, coletaram-se, nas obras, os seguintes dados: espessura do compensado; vãos entre os sarrafos ou perfis de estruturação; dimensões dos sarrafos ou

**Tabela 4**

 Resultados das medições das velocidades de concretagem *in loco*

| Pilar                  |            |                               |                                              |                          | Velocidade de concretagem (m/h) |         |        |
|------------------------|------------|-------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------|--------|
| Seção transversal (cm) | Altura (m) | Tempo de enchimento (minutos) | Área da seção transversal (cm <sup>2</sup> ) | Volume (m <sup>3</sup> ) | ABRASFE                         | Camadas | Direto |
| 30 x 50                | 3,48       | 0,84                          | 1.500                                        | 0,52                     | 243,97                          | 235,33  | 248,57 |
| 20 x 130               | 2,89       | 2,67                          | 2.600                                        | 0,75                     | 121,96                          | 125,10  | 64,94  |
| 35 x 80                | 2,90       | 2,16                          | 2.800                                        | 0,81                     | 98,21                           | 92,18   | 80,56  |
| 35 x 175               | 2,90       | 2,08                          | 6.125                                        | 1,78                     | 87,72                           | 103,15  | 83,65  |
| 19 x 695               | 3,90       | 14,45                         | 13.699                                       | 5,34                     | 24,25                           | 21,05   | 16,19  |

**Fonte:** elaborada pelos autores

perfis de estruturação; vãos entre os perfis de travamento; dimensões dos perfis de travamento.

Os dados das propriedades mecânicas do compensado, dos sarrafos de madeira e dos travamentos foram obtidos das tabelas da SH [18].

Para ambos os métodos, considerou-se que a pressão suportada pelas fôrmas é igual ao menor dos valores obtidos para cada pilar, ou seja, a pressão suportada pelo elemento menos resistente.

Também foram calculadas, para cada pilar, as pressões laterais de concreto, segundo os métodos ACI347 R-04, CIRIA R 108 e ABNT NBR 15696:2009, com as velocidades de concretagem medidas *in loco*.

## 4. Resultados e discussões

### 4.1 Medição da velocidade de concretagem

Os resultados das medições das velocidades de concretagem são apresentados na Tabela 4.

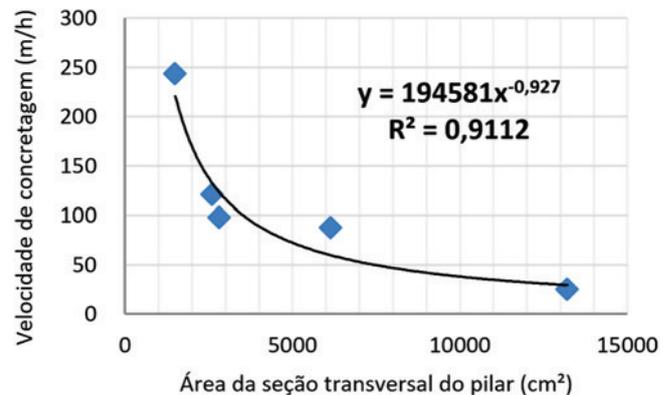
Observa-se na Tabela 4, que pelos três métodos de medição obtiveram-se valores de velocidade de concretagem superiores aos determinados como limite pelos métodos em estudo. O menor valor obtido foi 16,10 m/h, que superou em 137,57% o valor máximo determinado pela ABNT NBR 15696:2009 (7 m/h) e em 157,78% a velocidade de concretagem limite para paredes dada pelo ACI 347 R-04 (4,5 m/h). A maior velocidade medida (249,66 m/h) é 35,67 e 55,48 vezes maior do que os limites determinados na ABNT NBR 15696:2009 e pelo ACI 347 R-04, respectivamente.

As velocidades de concretagem obtidas pelo método em camadas para o pilar 35 x 175 cm (103,15 m/h) e pelo método direto para o pilar 20 x 130 cm (64,94 m/h) e para a parede 19 x 695 cm (16,19 m/h), não foram aproximadamente iguais aos demais valores correspondentes. Como pode ser notado na Tabela 4, ocorreu uma descontinuidade nos valores de velocidade obtidos por estes dois métodos, pois estes não seguiram sequencialmente como sendo inversamente proporcionais à área da seção transversal e ao volume do pilar. Estes erros podem ser justificados pelo fato de que a velocidade de concretagem foi medida sem nenhuma alteração das metodologias construtivas adotadas nas obras, o que pode levar a falta de precisão dos procedimentos.

As Figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, as correlações da área da seção transversal e do volume do pilar com a velocidade de concretagem medida *in loco*.

As velocidades de concretagem utilizadas nos gráficos foram as obtidas através do método da ABRASFE [19], pelo fato de que apresentaram uma sequência de valores decrescentes para os respectivos aumentos de seção transversal e volume.

Observa-se pelos gráficos das Figuras 8 e 9, que há uma boa correlação da velocidade de concretagem com a área da seção transversal e da velocidade de concretagem com o volume dos pilares. Para verificar a precisão das expressões encontradas, foi utilizado o seguinte exemplo da ABRASFE [19]: parede com seção transversal de 20,00 x 0,50 m e altura de 6,00 m, cuja velocidade de concretagem foi 2,10 m/h, para o lançamento do concreto com bomba de vazão igual a 21 m³/h. A área da seção transversal da parede é igual a 100.000 cm² e o volume é 60 m³, resultando, respectivamente, nas velocidades de concretagem de 4,51 e



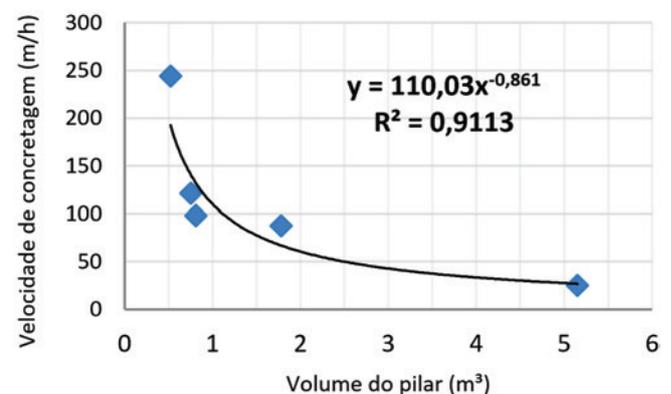
**Figura 8**

Relação entre velocidade de concretagem medida *in loco* e área da seção transversal dos pilares

Fonte: elaborada pelos autores

3,24 m/h. Percebe-se que utilizando o volume do pilar como dado de entrada, a velocidade de concretagem calculada aproxima-se melhor da medida *in loco* se comparada à obtida pela área da seção transversal. Nota-se também que, para o exemplo em questão, as velocidades de concretagem determinadas pelas correlações com área da seção transversal e volume do pilar são, nesta ordem, 2,15 e 1,53 vezes maiores do que a medida. Isto significa que os valores calculados por meio das correlações encontradas nos gráficos das Figuras 8 e 9 estão a favor da segurança, visto que, todas as relações entre pressão lateral do concreto fresco e velocidade de concretagem estudadas neste trabalho são diretamente proporcionais, como mostrado na Figura 6.

Outra observação realizada a partir das Figuras 8 e 9 é que para os pilares de alturas iguais ou próximas (2,89 e 2,90 m), apresentados na Tabela 4, os pontos posicionam-se próximos uns dos outros em ambos os gráficos. Isto significa que quanto mais pilares com características semelhantes forem monitorados, melhor será a correlação obtida entre estas e a velocidade de concretagem. Percebeu-se também que se um maior número de pilares, com



**Figura 9**

Relação entre velocidade de concretagem medida *in loco* e volume dos pilares

Fonte: elaborada pelos autores

as mais diferentes dimensões, porém com pequenas variações de um para outro, forem estudados a distância entre os pontos será menor, como ocorreu para os pilares de mesma altura. Além disso, os pontos têm a mesma distribuição de posição nos dois gráficos, ou seja, as relações encontradas possuem um comportamento semelhante, sendo ambas expressas por uma potência. Logo, partindo-se de um estudo mais detalhado, pode ser possível determinar a velocidade de concretagem pelo volume ou pela área da seção transversal do pilar, fazendo com que o cálculo da pressão e, conseqüentemente o dimensionamento das fôrmas, sejam realizados de forma mais coerente com a realidade das obras.

#### 4.2 Pressão máxima suportada pelas fôrmas

A Tabela 5 apresenta as máximas pressões suportadas estimadas, para cada pilar, a partir dos métodos de dimensionamento da SH [18] e da NBR 15696 [9] e dos modelos de cálculo da pressão lateral do concreto fresco estudados. Os valores de velocidade de concretagem utilizados foram os obtidos através do método da ABRASFE [19]. A temperatura do concreto foi adotada como 25° C (não foi aferida *in loco*), considerando-se que nos dados experimentais apresentados por Arslan [14], Arslan *et al.* [15], Maranhão [4], O'Janpa III [16] e Zhang *et al.* [6], a temperatura do concreto não ultrapassou 24° C e que o cálculo da pressão lateral do concreto fresco segundo a NBR 15696 [9] não permite considerar a influência de temperaturas acima de 25 °C. Além disso, de acordo com a pesquisa realizada por Gambale e Bittencourt [20], a temperatura dos concretos produzidos com cimento CP II, não ultrapassa os 25° C antes de 18 horas de idade.

Observa-se na Tabela 5, que, de maneira geral, a máxima pressão suportada pelas fôrmas calculada pelo método SH [18] é maior do que a obtida pelos critérios de dimensionamento de fôrmas recomendado pela NBR 15696 [9]. Ressalta-se que no método dos estados-limites, apresentado pela norma em questão, as ações são majoradas e as resistências minoradas, o que justifica, inicialmente, a diferença entre os valores obtidos por meio dos dois métodos de cálculo.

Também na Tabela 5, percebe-se que na maioria dos casos, o elemento menos resistente das fôrmas foi o compensado para o método SH [18] e a estruturação para a NBR 15696 [9]. No caso

da parede de 19x695 cm, os elementos menos resistente foram os perfis de estruturação, que suportam até 3,82 kPa, para o método da SH [18], e 0,45 kPa, para a NBR 15696 [9]. Tratam-se de valores de pressão muito pequenos, porém, ressalta-se que os resultados experimentais de pressão lateral do concreto fresco em paredes obtidos por O'Janpa III [16], apresentados na Tabela 2, variaram de 1,91 a 2,74 kPa, com velocidades de concretagem que foram de 12,20 a 36,60 m/h, sendo estes valores próximos à velocidade medida *in loco* para a parede de 19 x 695 cm (16,19 a 24,25 m/h), apresentadas na Tabela 4, o que demonstra a coerência dos resultados obtidos.

Nota-se, pela Tabela 5, que as pressões máximas suportadas pelas fôrmas calculadas a partir dos métodos da SH [18] e da NBR 15696 [9] são menores do que as estimadas através dos métodos de cálculo da pressão lateral do concreto fresco. A maior diferença se deu para o pilar 30 x 50 cm, com pressão lateral do concreto fresco estimada pela ABNT NBR 15696:2009 que superou 603,75 vezes a máxima pressão suportada pela fôrma calculada pelo método simplificado da SH [18]. Isto pode ser explicado pelo fato de que as velocidades de concretagem medidas *in loco*, são muito superiores aos limites estabelecidos pelos métodos de cálculo das normas.

As pressões calculadas pelo método CIRIA R 108, para os pilares 35 x 80 e 35 x 175 cm, se aproximaram mais das máximas pressões suportadas estimadas pelo método SH [18], apresentando diferenças de 33,61% e 20,60%, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 5.

Com as pressões máximas suportadas pelas fôrmas estimadas pelo método SH [18] e NBR 15696 [9] calcularam-se as velocidades de concretagem correspondentes a partir dos três modelos de cálculo da pressão lateral do concreto fresco. Os resultados são apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Nas Tabelas 6 e 7 é possível observar que, para os valores das pressões máximas suportadas pelas fôrmas as velocidades de concretagem são muito inferiores às medidas *in loco*, chegando a valores negativos, sendo a maioria deles menores do que o limite inferior determinado pelo ACI 347 R-04 para paredes, que é de 2,1 m/h. Também é possível observar que alguns dos valores de velocidade de concretagem das Tabelas 6 e 7 encontram-se na faixa de valores de velocidade de concretagem para as quais foram medi-

**Tabela 5**  
Pressão máxima suportada pelas fôrmas dos pilares

| Seção transversal (cm) | Pressão estimada pelo método SH (kPa) | Elemento menos resistente | Pressão estimada pela ABNT NBR 15696:2009 (kPa) | Elemento menos resistente | Pressões estimadas (kPa) |             |                     |
|------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|---------------------|
|                        |                                       |                           |                                                 |                           | ACI 347 R-04             | CIRIA R 108 | ABNT NBR 15696:2009 |
| 30 x 50                | 3,90                                  | Travamento                | 13,93                                           | Estruturação              | 819,33                   | 83,52       | 2.354,63            |
| 20 x 130               | 20,31                                 | Compensado                | 19,19                                           | Travamento                | 680,42                   | 69,36       | 1.176,57            |
| 35 x 80                | 41,83                                 | Compensado                | 4,42                                            | Travamento                | 682,78                   | 69,60       | 1.142,94            |
| 35 x 175               | 34,93                                 | Compensado                | 2,12                                            | Estruturação              | 682,78                   | 69,60       | 854,56              |
| 19 x 695               | 3,82                                  | Estruturação              | 0,45                                            | Estruturação              | 862,24                   | 93,60       | 253,97              |

Fonte: elaborada pelos autores

**Tabela 6**

Velocidades correspondentes à pressão máxima suportada pelas fôrmas dos pilares calculada pelo método simplificado da SH [18]

| Seção transversal (cm) | Pressão estimada pelo método SH (kPa) | Velocidade de concretagem medida (m/h) | Velocidade de concretagem calculada (m/h) |             |                     |
|------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------|---------------------|
|                        |                                       |                                        | ACI 347 R-04                              | CIRIA R 108 | ABNT NBR 15696:2009 |
| 30 x 50                | 3,90                                  | 243,97                                 | -0,18                                     | 0,00        | -0,91               |
| 20 x 130               | 20,31                                 | 121,96                                 | 0,71                                      | 0,11        | 0,73                |
| 35 x 80                | 41,83                                 | 98,21                                  | 1,89                                      | 0,96        | 2,49                |
| 35 x 175               | 34,93                                 | 87,72                                  | 1,51                                      | 0,59        | 2,19                |
| 19 x 695               | 3,82                                  | 24,25                                  | -5,81                                     | 0,00        | -0,92               |

Fonte: elaborada pelos autores

das e calculadas as pressões laterais do concreto dos gráficos das Figuras 3, 4 e 5, que foram de 0,45 a 6,38 m/h.

## 5. Conclusões

A partir dos resultados obtidos chegou-se à conclusão de que, para pilares concretados por bombeamento, as velocidades de concretagem medidas nas cinco obras de Goiânia ultrapassam os valores limitados pelo ACI 347 R-04 e ABNT NBR 15696:2009, pois, neste estudo, as velocidades medidas foram, respectivamente, 35,67 e 55,48 vezes maiores do que as velocidades limite. As velocidades de concretagem que são superiores aos limites determinados pelos métodos de cálculo ACI 347 R-04 e ABNT NBR 15696:2009 geram resultados de pressão muito superiores aos que possivelmente ocorrem nas fôrmas, chegando a ser 603,75 vezes maiores, neste estudo. Além disso, as velocidades de concretagem relativas às máximas pressões suportadas pelas fôrmas, determinadas pelos métodos ACI 347 R-04, CIRIA R 108 e ABNT NBR 15696:2009 são muito inferiores às medidas *in loco*, podendo chegar a valores negativos.

Tendo em vista que as pressões máximas suportadas pelas fôrmas, estimadas pelos métodos de dimensionamento de fôrmas SH [18] e ABNT NBR 15696:2009, são muito inferiores às pressões laterais do concreto calculadas com a velocidade de concretagem

medida *in loco*, pode-se afirmar que para velocidades a partir de 16,19 m/h, menor valor medido nesta pesquisa, não há uma boa correlação entre velocidade de concretagem e pressão lateral do concreto fresco nos modelos teóricos de cálculo ACI347 R-04, CIRIA R 108 e ABNT NBR 15696:2009. Isto também foi observado na análise realizada a partir dos dados experimentais obtidos por O'Janpa III [16], para os quais a menor velocidade de concretagem foi de 12,20 m/h, com a correspondente pressão lateral do concreto fresco medida igual a 2,45 kPa e calculadas, neste trabalho, iguais a 163,15 kPa para o ACI 347 R-04, 68,22 kPa para o CIRIA R 108 e 225,56 kPa para a ABNT NBR 15696:2009. Assim, confirma-se que as equações destes métodos de cálculo são válidas somente para as velocidades de concretagem limitadas por cada um, sendo, portanto, necessária a formulação de equações para estimar a pressão lateral do concreto fresco a altas velocidades de concretagem, conforme as atuais práticas no mercado da construção civil.

É possível determinar, para fins de projeto, a velocidade de concretagem em função do volume ou da área da seção transversal do pilar, obtendo-se, valores mais representativos dos que ocorrerão nas obras. As equações determinadas neste estudo, que representam tais correlações, apresentaram coeficiente de determinação igual a 0,91, apontando uma boa aproximação entre os valores de velocidade calculados e os medidos *in loco*, sendo que

**Tabela 7**

Velocidades correspondentes à pressão máxima suportada pelas fôrmas dos pilares calculada pelo método dos estados-limites segundo a ABNT NBR 15696:2009

| Seção transversal (cm) | Pressão estimada pela ABNT NBR 15696:2009 (kPa) | Velocidade de concretagem medida (m/h) | Velocidade de concretagem calculada (m/h) |             |                     |
|------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------|---------------------|
|                        |                                                 |                                        | ACI 347 R-04                              | CIRIA R 108 | ABNT NBR 15696:2009 |
| 30 x 50                | 13,93                                           | 243,97                                 | 0,37                                      | 0,01        | 0,09                |
| 20 x 130               | 19,19                                           | 121,96                                 | 0,65                                      | 0,09        | 0,62                |
| 35 x 80                | 4,42                                            | 98,21                                  | -0,15                                     | 0,00        | -0,63               |
| 35 x 175               | 2,12                                            | 87,72                                  | -0,28                                     | 0,00        | -1,09               |
| 19 x 695               | 0,45                                            | 24,25                                  | -6,45                                     | 0,00        | -1,26               |

Fonte: elaborada pelos autores

pelo volume do pilar, tem-se resultados melhores se comparados aos obtidos pela área da seção transversal. Porém, é necessário que se realizem mais pesquisas para que se obtenha um maior número de dados e, assim, uma relação que seja mais representativa das diversas dimensões de pilares e paredes.

## 6. Referências bibliográficas

- [1] FREITAS, N. D. B. Sistemas de cofragens racionalizadas e especiais para edifícios. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade da Madeira, 2011.
- [2] REZENDE, R. B. Uma visão sobre o uso de fôrmas e escoramentos em cidades de grande, médio e pequeno porte do Brasil Central e as novas diretrizes normativas. 2010. 164 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
- [3] NAZAR, N. Fôrmas e escoramentos para edifícios: critérios para dimensionamento e escolha do sistema. São Paulo: PINI, 2007. 173 p.
- [4] MARANHÃO, G. M. Fôrmas para concreto: subsídios para a otimização do projeto segundo a NBR 7.190/97. 2000. 226 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- [5] BARNES, J. M.; JOHNSTON, D. W. Fresh concrete lateral pressure on formwork. In: Construction Research Congress, 2003, Honolulu, *Anais...* Reston: ASCE, 2004.
- [6] ZHANG, W.; HUANG J.; LI, Z.; HUANG, C. An experimental study on the lateral pressure of fresh concrete in formwork. *Construction and building materials*, v. 111, p.450-460, 2016.
- [7] SANTILLI, A.; PUENTE, I, LOPEZ, A. Rate of placement discussion for the validation of experimental models of fresh concrete lateral pressure in columns. *Construction and building materials*, v. 24, p.934-945, 2010.
- [8] LEEMANN, A.; HOFFMANN, C.; WINNEFELD, F. Pressure of self-consolidating concrete on formwork. *Concrete International*, v.8, n. 2, p. 27-31, 2006.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15696:2009 : fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto – projeto, dimensionamento e procedimentos executivos. Rio de Janeiro, 2009.
- [10] CAUBERG, N.; DESMYTER, J.; PIÉRARD, J. Poussée-dubétonautocompactantsurlescoffrages. *Les Dossiers du CSTC*, v.3, n.7, p. 1-15, 2006.
- [11] BILLBERG, P. H.; ROUSSEL, N.; AMZIANE, S.; BEITZEL, M.; CHARITOU G.; FREUND, B.; GARDNER, J. N.; GRAMPEIX, G.; GRAUBNER, C. A.; KELLER, L.; KHAYAT, K. H.; LANGE, D. A.; OMRAN, A. F.; PERROT, A.; PROSKE, T.; QUATTROCIOCCI, R.;VANHOVE, Y. Field validation of models for predicting lateral form pressure exerted by SCC. *Cementand concrete composites*, v. 54, p. 70-79, 2014.
- [12] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 347 R-04: Guide for formwork for concrete. ACI, 2004.
- [13] WAARDE, F. Formwork pressures when casting self compacting concrete. 2007. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Concrete Structures Faculty of Civil Engineering Technical University of Delft, Delft, 2007.
- [14] ARSLAN, M. Effects of drainer formworks on concrete lateral pressure. *Construction and building materials*, v. 16, p. 253-259, 2002.
- [15] ARSLAN, M.; SIMSEK, O.; SUBASI, S. Effects of formwork surface materials one concrete lateral pressure. *Construction and building materials*, v. 19, p. 319-325, 2005.
- [16] O'JANPA III, J. V. Lateral pressures of fresh concrete on wall formwork under high rates of placement. Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 2005. 123 p.
- [17] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.
- [18] SH Fôrmas, escoramentos e andaimes. Manual SH de fôrmas para concreto e escoramentos metálicos. São Paulo: PINI, 2008. 287 p.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FÔRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO. Pressão do concreto fresco sobre as fôrmas. 34 slides, color. Acompanha texto. Disponível em: <[http:// livrozilla.com/doc/21923/-abrasfe](http://livrozilla.com/doc/21923/-abrasfe)>. Acesso em: 14 mai. 2016.
- [20] GAMBALE, E. A.; BITTENCOURT, R. M.Análise do Fenômeno Térmico em Concreto com cimento Porthand Branco. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 50., 2008, Salvador. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 2008.