

ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETOS CONVENCIONAIS

Berenice Martins Toralles. E-mail: toralles@uel.br
Álison Franco do Couto. E-mail: alissoncouto@ymail.com
Geovana Souza Ferreira Nogueira. E-mail: geovanasouzanogueira@gmail.com
Gersson Fernando Barreto Sandoval. E-mail: gersson.barreto@gmail.com
Guilherme Perosso Alves. E-mail: guilherme1_pa@hotmail.com
Isabela Cristina de Souza. E-mail: isabela07@gmail.com
Rafaela Salvador Paulino. E-mail: rafaellaspaulino@gmail.com

Resumo: Um método de dosagem de concretos consiste em um estudo direcionado para a escolha dos seus materiais constituintes e a fixação das devidas proporções na mistura, em função de uma propriedade previamente requerida. O objetivo do presente trabalho foi comparar, por meio teórico e prático, os aspectos funcionais e operacionais dos métodos de dosagem para concretos convencionais da ABCP, O'Reilly e IPT, para uma resistência característica à compressão fixada em 25MPa. Para isso, foi verificado o abatimento real de concretos produzidos por esses métodos e resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias de idade. Com base nos resultados, os métodos da ABCP e O'Reilly apresentaram traços muito semelhantes e produziram concretos com f_{c28} superiores aos 31,6MPa requeridos para atender à premissa de um concreto com $f_{ck} = 25\text{MPa}$ e desvio padrão (S_d) de 4,0MPa. Já o concreto produzido pelo método do IPT apresentou consumo de cimento consideravelmente inferior aos demais. Esse fato indica que o método do IPT, embora sua aplicação seja tecnicamente mais trabalhosa, tem capacidade de melhor explorar as características dos materiais utilizados.

Palavras-chave: ABCP, O'Reilly, IPT, consumo de cimento, eficiência.

COMPARATIVE STUDY OF DIFFERENT DESIGN METHODS FOR CONVENTIONAL CONCRETES

Abstract: A concrete design method consists in a study directed to choosing its constituent materials and the fixation of the due proportions of the mixture, according to a previously required property. The aim of the present work was comparing, theoretically and practically, functional and operational aspects of the conventional concrete design methods of ABCP (Portland Cement Brazilian Association), O'Reilly and IPT (Technological Research Institute), for a characteristic compressive strength of 25 MPa. For that, the real slump of the concretes produced by these methods and the axial compressive strength at ages 7 and 28 days were evaluated. Based on the results, the ABCP and O'Reilly methods presented very similar proportions and produced concretes with superior f_{c28} than the 31.6MPa required to meet the premise of a concrete with $f_{ck} = 25\text{MPa}$ and standard deviation (S_d) of 4,0MPa. As for the concrete produced according to the IPT method, it presented considerably lower cement consumption when compared to the others. This fact points that the IPT method, although its application is technically more labor-intensive, has the capacity to better exploit the characteristics of the materials used.

Keywords: ABCP, O'Reilly, IPT, cement consumption, efficiency.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é utilizado nos mais variados tipos de obras ao redor do mundo em função da sua resistência, no estado endurecido, e de sua acomodação às mais diversificadas formas, no estado fresco (COUTO et al., 2013; PASINI; VARGAS, 2015). É considerado hoje em dia como um dos materiais mais tradicionais e um dos mais utilizados na construção civil. Esse fato exige um interesse cada vez maior no estudo e desenvolvimento dos seus materiais constituintes e na otimização dos processos produtivos de maneira global, objetivando um produto final com características e propriedades uniformes, com desempenho e durabilidade de acordo com as mais variadas exigências do mercado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Enquanto material, o concreto convencional pode ser entendido como uma mistura heterogênea composta por cimento, água e agregados miúdos e graúdos, podendo haver, eventualmente, a incorporação de um ou mais componentes (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Nunes (2005), apesar de grande parte do volume de concreto ser ocupado pelos agregados e de suas características físicas e químicas interferirem nas propriedades do produto final, a resistência do concreto convencional não é determinada pela resistência dos agregados, uma vez que estes são bem mais resistentes que a matriz cimentícia e a zona de transição dessa. Além disso, as características físicas como tamanho, forma e granulometria dos agregados estão relacionadas à relação água/cimento, que conseqüentemente tem relação direta com as alterações dos valores de resistência mecânica (ALHADAS, 2008).

As alterações na produção e composição do concreto afetarão suas respostas, tanto em estado fresco quanto endurecido. Uma maior quantidade de água, por exemplo, reduzirá significativamente a viscosidade plástica e a tensão de escoamento, sendo refletida também em uma diminuição na resistência à compressão do concreto curado (CASTRO, 2007; ZERBINO; BARRAGÁN, 2007).

Um bom desempenho nas propriedades exigidas ao concreto depende dos materiais constituintes, da proporção entre eles e da tecnologia de preparo e controle do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Nessas circunstâncias, uma das etapas básicas do processo produtivo do concreto é a escolha e dosagem dos materiais constituintes.

Entende-se como método de dosagem de concretos os estudos direcionados para a escolha dos seus materiais constituintes e a fixação das devidas proporções na mistura, em função de uma propriedade previamente requerida (NEVILLE, 1997; TUTIKIAN; HELENE, 2011; COUTO et al., 2013; AHMED et al., 2016). Concretos de boa qualidade são dosados para atingir propriedades tais quais resistência, durabilidade e consistência, sendo os métodos de dosagem uma base inicial para se atingir as características desejadas (AHMED et al., 2016).

Existem diferentes métodos de dosagem para concretos mas, apesar das peculiaridades de cada um, algumas etapas são comuns a maioria deles, como a determinação da resistência-alvo, a correlação entre resistência à compressão e a relação água/cimento, entre outros. Ressalta-se que os métodos de dosagem de concretos não são universais, uma vez que são desenvolvidos em condições de clima, exposição e com materiais específicos de uma determinada localidade (AHMED et al., 2016).

De modo geral, um estudo de dosagem ambiciona obter uma mistura ideal e mais econômica, considerando a disponibilidade dos materiais de determinada região para atendimento de uma série de requisitos. Esta série será maior ou menor em função da complexidade do trabalho a ser realizado e segundo o grau de esclarecimento técnico e prático do usuário que demandou o estudo (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Diante disso, o objetivo deste trabalho é comparar, por meio teórico e prático, os aspectos funcionais e operacionais de três métodos de dosagem para concretos convencionais. Foram verificados os métodos de dosagem da ABCP, O'Reilly e IPT, para uma resistência característica fixada em 25MPa e a comparação entre os métodos se deu por meio das respostas das misturas de concreto nos estados fresco e endurecido..

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Na produção dos concretos foi utilizado cimento Portland do tipo CP II-Z-32.

O agregado miúdo utilizado foi a areia quartzosa lavada de rio, oriunda do Rio Paraná, e o agregado graúdo foi a brita 19mm basáltica, disponível na região de Londrina.

A água de amassamento utilizada foi a distribuída pela fornecedora local, a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

2.2. Métodos

2.2.1. Caracterização dos Materiais

A determinação da massa específica do cimento Portland CP II-Z-32 foi realizada conforme NBR NM 23:2000, da areia conforme a NBR 9776:1987 e da brita 19mm segundo a NBR NM 53:2003. As massas unitárias compactadas da areia e da brita 19mm foram obtidas conforme a NBR NM 45:2006 e as análises granulométricas dos agregados graúdo e miúdo utilizados foram feitas segundo a NBR NM 248:2003. Tais características podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características físicas dos agregados utilizados.

Material	Massa Específica	Massa Unitária Compactada	Módulo de Finura	Dimensão Máxima Característica
	δ (g/cm ³)	γ_c (g/cm ³)	MF	D _{máx} (mm)
Cimento	3,11	-	-	-
Areia	2,64	1,88	2,7	-
Brita 1	2,95	1,72	-	19

2.2.2. Parâmetros de Dosagem

Todos os concretos, independentemente do método de dosagem utilizado, foram produzidos com os mesmos parâmetros, de forma que os resultados produzidos pudessem ser comparados posteriormente. Esses podem ser conferidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de dosagem estabelecidos.

Parâmetros de Dosagem		
f_{ck}	25	MPa
S_d (NBR 12655)	4,0	MPa
Abatimento	8 ± 1	cm
Condição de exposição (NBR 6118)	Urbana	

Sabendo-se que $f_{ck} = f_{cj} - 1,65 \cdot S_d$, com base nos dados da Tabela 2, conclui-se que os concretos deveriam ser dosados com uma resistência-alvo $f_{c28} = 31,6$ MPa.

2.2.3. Método de Dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)

2.2.3.1. Fixação da relação água/cimento (a/c)

A fixação da relação a/c deve ser pautada nos critérios de durabilidade e de resistência mecânica. Quanto à resistência, adotam-se as curvas de relação a/c em relação ao tipo de cimento, como as curvas de Walz mostradas na Figura 1. Em termos de durabilidade, devem ser observadas as orientações de relações a/c máximas para as diferentes classes de agressividade ambiental, segundo a NBR 6118:2014.

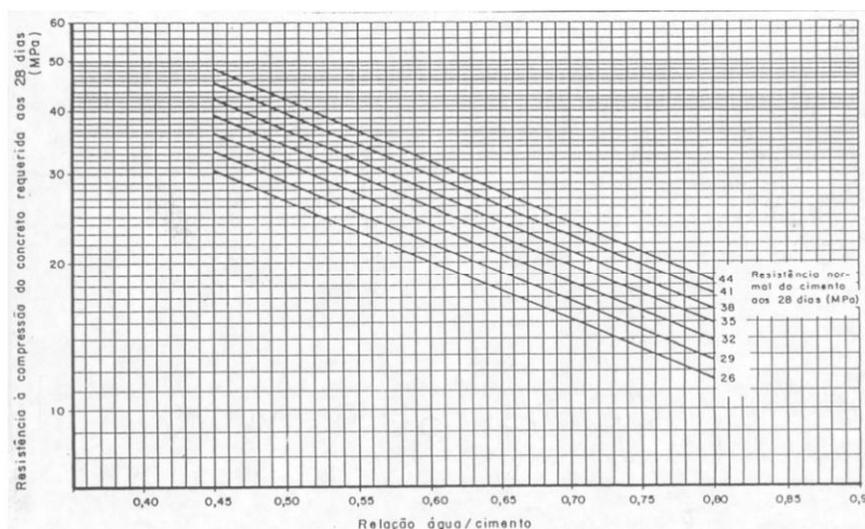


Figura 1 - Curvas de Walz para a determinação da relação água/cimento.

2.2.3.2. Determinação do consumo de água (Ca)

Os valores de consumo de água apresentados na Tabela 3 são recomendados como pontos de partida, devendo ser usados como primeira aproximação. Assim, a água de amassamento poderá ser determinada experimentalmente a partir dos valores recomendados.

Tabela 3 - Consumo de água aproximado (L/m³).

Abatimento (mm)	Dimensão característica máxima do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19	25	31,5	37,5
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 120	230	205	200	195	190

2.2.3.3. Determinação do consumo de cimento (C)

O consumo de cimento (C) inicial é calculado com base no consumo de água (Ca) e na relação a/c, por meio da Equação 1.

$$C = \frac{Ca}{a/c} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1)$$

Onde:

C é o consumo de cimento;

Ca é o consumo de água e

a/c é a relação água/cimento.

2.2.3.4. Determinação do consumo dos agregados graúdos (Cb) e miúdos (Cm)

Neste método, a proporção de agregados miúdo/gráúdo é determinada pelo teor ótimo de agregado graúdo na mistura, em função da sua dimensão máxima característica e do módulo de finura do agregado miúdo, enquanto o consumo de areia é determinado em função dos teores de pasta e agregado graúdo do concreto.

O consumo estimado de agregado graúdo é obtido a partir dos valores da Tabela 4. São apresentados volumes compactados a seco por metro cúbico de concreto, em função da sua dimensão máxima (D_{máx}) e do módulo de finura (MF) da areia.

Tabela 4 - Volume compactado seco (V_c) de agregado graúdo para um metro cúbico de concreto.

MF	D _{máx} (mm)				
	9,5	19	25	31,5	37,5
1,6	0,665	0,790	0,815	0,840	0,865
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

O consumo de brita é determinado pela Equação 2:

$$C_b = V_c \cdot \gamma_c \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2)$$

Onde:

C_b é o consumo de brita;

V_c é o volume compactado por m^3 de concreto e

γ_c é a massa unitária compactada do agregado graúdo.

A determinação do consumo do agregado miúdo (C_m) admite que o volume do concreto é composto pela soma dos volumes absolutos de cimento, água e dos agregados, conforme a Equação 3.

$$V_m = 1 - \left(\frac{C}{\delta_c} + \frac{C_b}{\delta_b} + \frac{C_a}{\delta_a} \right) \quad (3)$$

Onde:

δ_c , δ_b e δ_a são, respectivamente, as massas específicas do cimento, agregado graúdo e água.

V_m é volume do agregado miúdo e

C , C_b e C_a são os consumos de cimento, agregado graúdo e água, respectivamente.

O consumo de areia é calculado conforme a Equação 4.

$$C_m = V_m \cdot \delta_m \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (4)$$

Onde:

C_m é o consumo de agregado miúdo;

V_m é o volume do agregado miúdo e

δ_m é a massa específica do agregado miúdo.

2.2.3.5 Apresentação do traço

A apresentação do traço em massa é feita a partir das relações dos diferentes materiais em relação à massa de cimento, conforme mostra a Equação 5.

$$1: \frac{C_m}{C} : \frac{C_b}{C} : a/c \quad (5)$$

Onde:

C_m é o consumo de areia;

C_b é o consumo de brita;

C é o consumo de cimento;

a/c é a relação água/cimento.

2.2.4. Método de Dosagem de O’Reilly

Viterbo O’Reilly propôs um método de dosagem de concretos que busca a maior compacidade da mistura. De forma inicial, o método é apoiado pelo método do American Concrete Institute (ACI) para definir fatores como consumo de água, resistência à compressão e relação água/cimento.

O’Reilly estabelece que a melhor proporção de agregados miúdos e graúdos é obtida através da menor porcentagem de vazios, sendo assim, aumenta-se os pontos de contato entre os grãos, visando otimizar a resistência e o consumo de cimento do material. O método é composto por nove passos, conforme mostra a Figura 2.

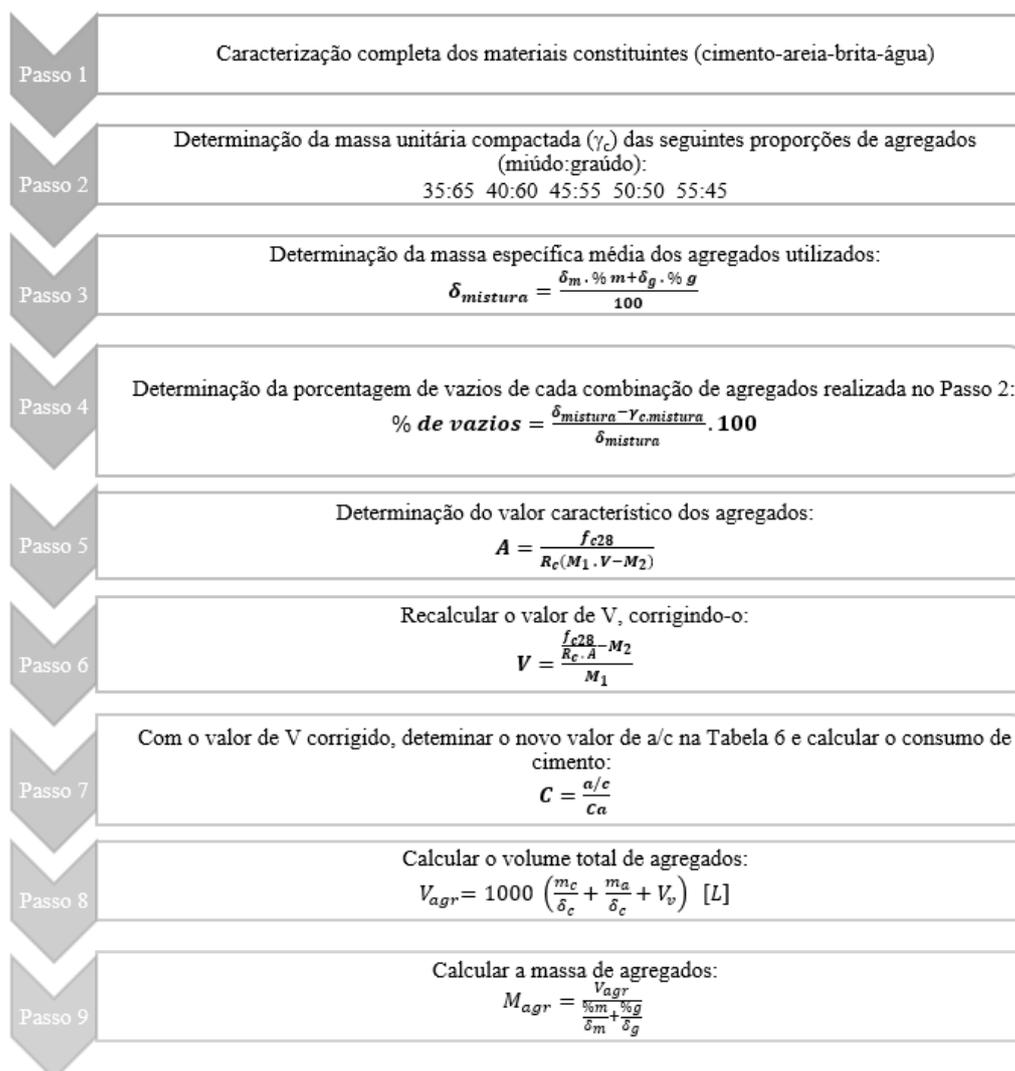


Figura 2 - Sequência do método de O'Reilly.

Onde:

$\delta_{mistura}$ é a massa específica média da mistura de agregados utilizados;

δ_m e δ_g são as massas específicas dos agregados miúdos e graúdos, respectivamente;

%m e %g são os percentuais ideais de agregado miúdo e graúdo, respectivamente;

$\gamma_{c.mistura}$ é a massa unitária compactada da mistura de agregados utilizados;

f_{c28} é a resistência-alvo do concreto aos 28 dias;

R_c é a resistência do cimento utilizado;

A é um valor adimensional que representa as características dos agregados;

M_1 e M_2 são valores adimensionais tabelados, dependentes do abatimento desejado;

V é um valor adimensional tabelado relacionado à relação água/cimento;

a/c é a relação água/cimento;

Ca é o consumo de água, segundo a Tabela 3 e

V_v é o volume de vazios.

A determinação dos fatores M_1 e M_2 para cálculo da característica dos agregados (A) é feita por meio da Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores M_1 e M_2 , relativos ao abatimento adotado.

Abatimento (cm)	M_1	M_2
1	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000
3	4,4470	0,2930
4	4,3843	0,3140
5	4,3239	0,3101
6	4,2635	0,3189
7	4,2031	0,3281
8	4,1427	0,3375
9	4,0823	0,3472
10	4,0219	0,3572
11	3,9615	0,3674
12	3,9011	0,3780
13	3,8407	0,3888
14	3,7803	0,4000
15	3,7199	0,4115
16	3,6595	0,4233

O fator V, relacionado à relação água/cimento adotada, pode ser obtido por meio da Tabela 6.

Tabela 6 - Fator V, relativo à relação água/cimento adotada.

a/c	V								
0,30	0,5229	0,40	0,3979	0,50	0,3010	0,60	0,2218	0,70	0,1549
0,31	0,5086	0,41	0,3872	0,51	0,2924	0,61	0,2147	0,71	0,1487
0,32	0,4946	0,42	0,3768	0,52	0,2840	0,62	0,2076	0,72	0,1427
0,33	0,4815	0,43	0,3665	0,53	0,2757	0,63	0,2007	0,73	0,1367
0,34	0,4685	0,44	0,3565	0,54	0,2676	0,64	0,1938	0,74	0,1308
0,35	0,4559	0,45	0,3468	0,55	0,2556	0,65	0,1870	0,75	0,1249
0,36	0,4437	0,46	0,3372	0,56	0,2518	0,66	0,1805	0,76	0,1192
0,37	0,4318	0,47	0,3279	0,57	0,2441	0,67	0,1739	0,77	0,1135
0,38	0,4220	0,48	0,3186	0,58	0,2366	0,68	0,1765	0,78	0,1079
0,39	0,4089	0,49	0,3098	0,59	0,2291	0,69	0,1612	0,79	0,1024

O método busca diminuir a porcentagem de vazios dos agregados para aumentar os pontos de contato entre as partículas, facilitando a redistribuição de esforços assim que aplicada uma carga e aumentando, conseqüentemente, a resistência.

Segundo O'Reilly, com a otimização granulométrica proposta, o consumo de cimento pode ser reduzido em até 15%, tornando-se uma alternativa interessante sob o ponto de vista econômico.

2.2.5. Método de Dosagem do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT)

O método do IPT é baseado na determinação experimental de um teor de argamassa ideal para o recobrimento do agregado graúdo utilizado. Ele divide-se, basicamente, em duas etapas. A primeira delas consiste na determinação do teor de argamassa ideal e, a segunda, no traçado de um ábaco de dosagem.

2.2.5.1. Etapa 1 – Determinação do teor de argamassa ideal

Nessa etapa devem ser produzidas, ao menos, três misturas experimentais, com valor de abatimento pré-estabelecido. A princípio, parte-se de um traço piloto 1:m, onde m representa os teores unitários de agregados miúdo e graúdo somados e cujo valor pode ser arbitrado dentro de limites razoáveis ($3 \leq m \leq 8$). Determinado o traço piloto, este é desmembrado para que se conheçam as quantidades relativas de cada agregado, isto é, areia (a) e brita (b).

Primeiramente, conhecendo-se as características dos agregados e a forma de adensamento, obtém-se o volume unitário de brita compactada (V_c), a partir da Tabela 7:

Tabela 7 - Volume unitário de brita compactada.

m	Areia	Dimensão máxima do agregado graúdo (mm)							
		9,5		19		25		38	
		Manual	Vibrad.	Manual	Vibrad.	Manual	Vibrad.	Manual	Vibrad.
3	grossa	0,88	0,96	1,23					
	média	0,92	0,99	1,30					
	fina	0,96	1,03	1,35					
4	grossa	1,06	1,13	1,49	1,60	1,59	1,70	1,69	
	média	1,10	1,18	1,55	1,66	1,65	1,77	1,76	
	fina	1,14	1,22	1,61	1,72	1,71	1,84	1,82	
5	grossa	1,23	1,32	1,73	1,86	1,84	1,99	1,97	2,11
	média	1,28	1,37	1,81	1,94	1,92	2,06	2,05	2,20
	fina	1,33	1,43	1,88	2,01	2,00	2,15	2,12	2,29
6	grossa	1,44	1,51	1,98	2,13	2,11	2,27	2,25	2,42
	média	1,47	1,57	2,06	2,22	2,20	2,36	2,34	2,51
	fina	1,52	1,64	2,14	2,31	2,29	2,46	2,43	2,62
7	grossa	1,58	1,70	2,23	2,40	2,38	2,55	2,53	2,73
	média	1,65	1,77	2,32	2,50	2,47	2,66	2,64	2,83
	fina	1,72	1,84	2,51	2,60	2,57	2,77	2,71	2,95
8	grossa		1,89	2,49	2,68	2,65	2,84	2,82	3,04
	média		1,97	2,58	2,78	2,75	2,96	2,93	3,16
	fina		2,05	2,69	2,89	2,87	3,08	3,06	3,28

Em seguida, calcula-se o valor unitário de brita (b) do traço experimental, a partir da Equação 6:

$$V_c = b/\gamma_c \quad (6)$$

Onde:

V_c é o volume unitário de brita compactada;

b é o valor unitário de brita do traço e

γ_c é a massa unitária compactada da brita.

Após determinado o valor unitário de brita, calcula-se o valor unitário de areia (a), por meio da Equação 7:

$$m = a + b \quad (7)$$

Onde:

m é o valor unitário de agregados, estabelecido no início;

a é o valor unitário de areia do traço e

b é o valor unitário de brita do traço.

Conhecendo-se os valores unitários de agregados desmembrados, calcula-se o teor de argamassa (α_1) do traço obtido, segundo a Equação 8:

$$\alpha_1 = \frac{1 + a}{1 + m} \quad (8)$$

Onde:

α_1 é o teor de argamassa do traço;

a é o valor unitário de areia do traço e

m é o valor unitário de agregados.

O teor de argamassa (α_1) obtido serve, então, de base para a definição de, pelo menos, outros dois teores de argamassa (α_2 e α_3) arbitrados dentro do seguinte intervalo:

$$0,40 \leq \alpha \leq 0,60$$

Para o mesmo valor de m , estabelecido no início dessa etapa, cada teor de argamassa pode ser desmembrado em um traço distinto utilizando as Equações 7 e 8, conforme segue:

$$\alpha_1 \rightarrow 1 : a : b$$

$$\alpha_2 \rightarrow 1 : a_2 : b_2$$

$$\alpha_3 \rightarrow 1 : a_3 : b_3$$

A três misturas experimentais devem ser produzidas, adicionando-se água de amassamento até que essas atinjam o valor do abatimento pré-fixado.

Conhecendo-se a quantidade de água adicionada em cada caso, calcula-se as três relações água/materiais secos (H) e plota-se um gráfico $H \times \alpha$, que deve apresentar forma parabólica. O valor de α no vértice dessa parábola representa o valor de α_{ideal} , que será utilizado na Etapa 2.

2.2.5.2. Etapa 2 – Montagem do ábaco de dosagem

Sabendo-se o teor de argamassa ideal (α_{ideal}) para o agregado graúdo que está sendo utilizado, inicia-se a segunda etapa do método arbitrando-se, ao menos, outros dois valores de m , aqui denominados m_2 e m_3 . Quanto maior o número de variações de m adotadas, mais completo será o ábaco de dosagem e, por consequência, uma maior variedade de concretos poderão ser produzidos a partir desse.

Com valores de m estabelecidos e o valor de α_{ideal} determinado, reconstitui-se os traços unitários dos concretos a serem produzidos. Primeiramente, determina-se o valor unitário de areia (a), segundo a Equação 8 e, na sequência, o valor unitário de brita (b), fazendo uso da Equação 7. Com isso, deve-se chegar a três novos traços, conforme segue:

$$\alpha_{ideal} \rightarrow 1 : m \rightarrow 1 : a : b$$

$$\alpha_{ideal} \rightarrow 1 : m_2 \rightarrow 1 : a_2 : b_2$$

$$\alpha_{ideal} \rightarrow 1 : m_3 \rightarrow 1 : a_3 : b_3$$

Concretos com esses três traços devem ser produzidos, adicionando-se água de amassamento até que as misturas atinjam o abatimento pré-estabelecido. Na sequência, as massas específicas dos concretos em estado fresco devem ser aferidas, por meio das quais é possível estimar o consumo de cimento, conforme mostra a Equação 9:

$$C = \frac{\delta_{cfresco}}{1 + m + a/c} \quad (9)$$

Onde:

C é o consumo de cimento;

$\delta_{cfresco}$ é a massa específica do concreto, em estado fresco;

m é o valor unitário de agregados e

a/c é a relação água/cimento da mistura produzida.

Em seguida, corpos de prova devem ser moldados, de forma que a resistência à compressão axial possa ser verificada em idades pré-estabelecidas.

Possuindo os valores de resistência à compressão, o ábaco de dosagem pode ser montado. Esse é composto de três curvas:

1) Lei de Abrams – Resistência à compressão (f_{cj}) x Relação água/cimento (a/c);

2) Lei de Lyse – Teor unitário de agregados (m) x Relação água cimento (a/c) e

3) Lei de Molinari – Teor unitário de agregados (m) x Consumo de cimento (C).

A partir de tais curvas, diferentes concretos podem ser dosados a partir de diferentes parâmetros, sempre com o mesmo valor de abatimento.

2.2.6. Avaliação das Propriedades dos Concretos Produzidos pelos Diferentes Métodos

Para cada concreto produzido foram verificados o abatimento real, conforme a NBR NM 67:1998 e a resistência à compressão axial, aos 7 e 28 dias de idade, segundo a NBR 5739:2007.

Para o ensaio de compressão axial, corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura), foram moldados manualmente e curados conforme os procedimentos da NBR 5738:2008. Três espécimes foram moldados para ruptura em cada idade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ábaco de Dosagem do Método do IPT

A aplicação do método de dosagem do IPT, utilizando os agregados cujas características são mostradas na Tabela 1, geraram as três curvas de dosagem mostradas no ábaco da Figura 3.

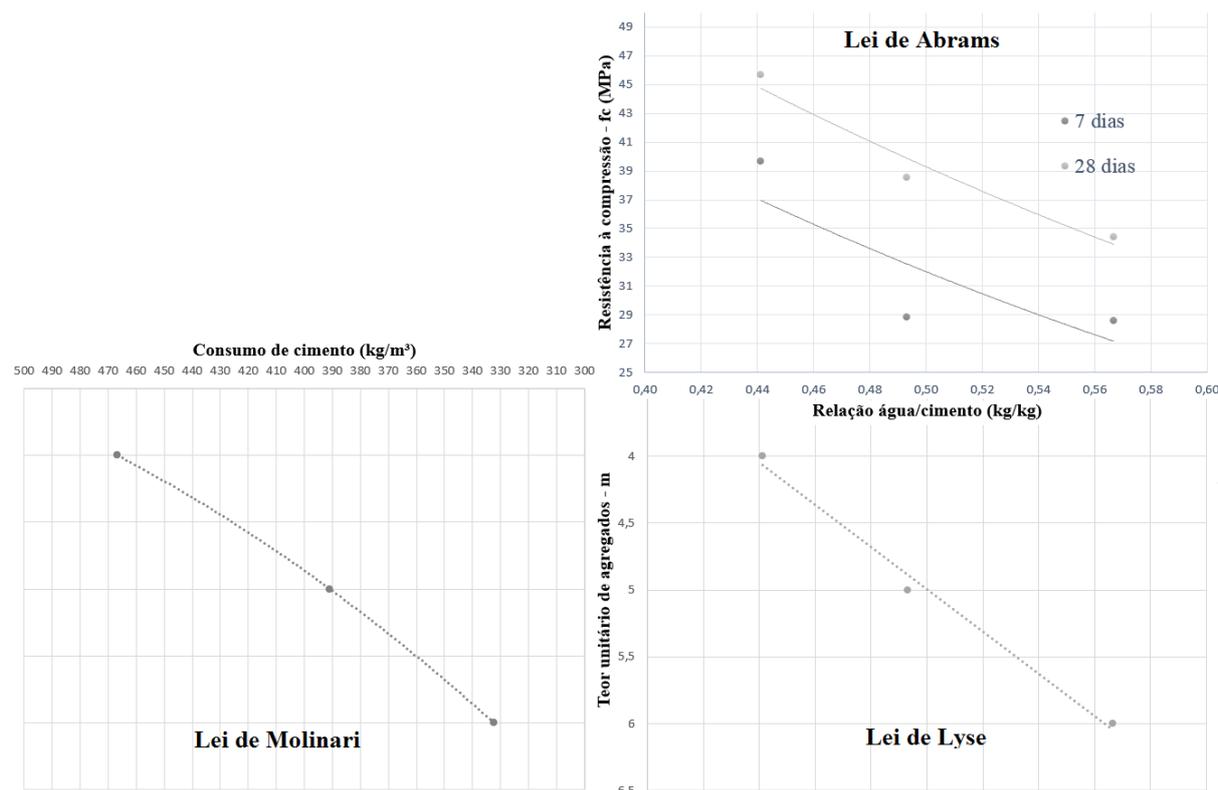


Figura 3 - Ábaco de Dosagem do Método do IPT.

Analisando-se as curvas apresentadas pela Figura 3, o primeiro apontamento que se pode fazer é o fato de que a dosagem do concreto com resistência-alvo de $f_{c28} = 31,6$ MPa teve de ser realizada extrapolando-se a curva produzida pelos pontos experimentais, uma vez que essa não contemplava tal valor.

Com base no gráfico apresentado, é possível perceber que uma característica positiva do método do IPT é o fato de que ele permite a dosagem de concretos partindo-se de vários parâmetros diferentes, não apenas da resistência-alvo ou da relação água/cimento. É possível, por exemplo, dosar um concreto visando-se um consumo reduzido de cimento ou um consumo elevado de agregados, sempre resultando em um produto final de consistência conhecida. Tal fato fornece uma gama de possibilidades normalmente não contemplada por outros métodos de dosagem.

3.2. Análise dos Concretos Produzidos com Diferentes Métodos

Os concretos produzidos com os três métodos de dosagem analisados nesse estudo apresentaram as características mostradas na Tabela 8.

Tabela 8 - Traço e consumo de materiais para os três métodos de dosagem avaliados.

Método	Cimento	Areia	Brita 1	a/c	1:m	C (kg/m³)	α	H	Abatimento (cm)
ABCP	1	1,76	2,87	0,49	1 : 4,63	418	49%	8,7%	9
O'Reilly	1	1,82	2,73	0,50	1 : 4,55	412	51%	9,0%	14
IPT	1	2,66	3,80	0,59	1 : 6,46	314	49%	7,9%	5,5

Os traços apresentados na Tabela 8 foram obtidos para os três métodos de dosagem avaliados nesse estudo, para se produzir concretos com os parâmetros fixados na Tabela 2. Cada um dos métodos avaliados parte de princípios e considerações distintas e, por consequência, proporciona os materiais de forma diferente para atender o desempenho desejado.

Como pode ser observado na Tabela 8, o método do IPT apresentou o traço menos rico entre os três avaliados, com um valor de m igual a 6,46. Por consequência, isso proporcionou também o menor consumo de cimento entre as três situações avaliadas, com 314 kg/m³ de concreto produzido.

Isso se deve ao fato de que a dosagem do IPT, embora seja uma metodologia trabalhosa em relação às demais, produz ábacos de dosagem próprios, utilizando nas misturas experimentais os mesmos materiais que serão utilizados na produção dos concretos de aplicação real. Dessa forma, o método de dosagem do IPT permite que o potencial dos materiais componentes da mistura seja melhor aproveitado, extraído deles o limite de seu desempenho mecânico. Com base nisso, é possível afirmar que o método do IPT é capaz de fornecer um melhor custo-benefício a princípio, fato que pode ser otimizado traçando-se curvas de Walz próprias para uso dos métodos da ABCP e de O'Reilly, de forma que os materiais utilizados sejam usados com maior eficiência.

Por outro lado, o método da ABCP e o método de O'Reilly sugeriram traços bastante semelhantes, em termos de proporcionamento de materiais, relação água/cimento e consumo de cimento. Essa ocorrência não chega a ser surpreendente, uma vez que o método de O'Reilly tem suas bases estabelecidas pelo método de dosagem da ACI, que por sua vez foi a base para desenvolvimento do método da ABCP. Com os materiais utilizados nesse estudo, constatou-se que a redução no consumo de cimento no método de O'Reilly foi de apenas 1,4% em relação ao método da ABCP, muito aquém dos 15% idealizados pelo proponente do método.

A ideia central do método de O'Reilly é realizar modificações no método da ACI, de forma a se buscar a otimização da compacidade de uma determinada proporção agregados-aglomerante. Dessa forma, a proximidade dos traços obtidos pelos métodos de O'Reilly e da ABCP leva a crer que os materiais utilizados nesse estudo, quando aplicados em conjunto, já apresentam características de compacidade satisfatórias, de maneira que os procedimentos para otimizar a matriz do produto final não tenham surtido efeito nas proporções desejadas.

Nenhum dos concretos produzidos contou com incorporação de aditivos na mistura. A trabalhabilidade e abatimento obtidos estão diretamente relacionados ao proporcionamento dos materiais e à relação água/cimento de cada caso.

Sendo assim, observando-se sob a ótica da relação água/cimento, o método do IPT foi aquele que apresentou maior demanda por água para atender as características de consistência desejadas, com a/c de 0,59. Uma vez que este mesmo método também foi o que apresentou a maior proporção de agregados no traço, em relação aos demais avaliados, a maior demanda por água era uma consequência para atender ao abatimento-alvo.

Os métodos da ABCP e O'Reilly, conforme já mencionado, apresentaram valores de relação água/cimento bastante similares, uma vez que ambos se basearam na mesma curva mostrada na Figura 1. A pequena diferença entre eles se deu devido à correção de a/c proposta no método de O'Reilly, que utiliza as curvas de Walz apenas como ponto de partida.

Concretos com menores consumos de água tendem a apresentar maior resistência mecânica. Em termos estequiométricos, relações água/cimento em torno de 0,23 são suficientes para proporcionar a completa hidratação do cimento Portland (DONATELLO; TYRER; CHEESEMAN, 2010). Dessa forma, todo o excedente de água se deve à conferência da consistência e trabalhabilidade desejáveis.

Nesse caso, sob o ponto de vista de durabilidade, o concreto dosado pelo método do IPT certamente apresentará o menor desempenho, devido à maior relação água/cimento, que tende a aumentar a presença de poros capilares permeáveis no produto final. No caso dos métodos da ABCP e de O'Reilly, a relação água/cimento em torno de 0,50 é considerada um valor limite de conferência de fluidez sem prejuízos significativos à durabilidade. Em todos os casos, entretanto, é possível reduzir a quantidade de água adicionada à mistura lançando-se mão de

aditivos redutores de água, como plastificantes e superplastificantes, não sendo esse um fator impeditivo ao uso de nenhum dos métodos aqui avaliados.

Com relação à consistência obtida nos concretos produzidos, o método da ABCP se destacou por ser o único que atingiu o abatimento-alvo de 8 ± 1 cm. Embora o método de O'Reilly tenha produzido um proporcionamento de materiais muito similar ao método da ABCP, o abatimento obtido diferiu significativamente, obtendo 14cm. Tal ocorrência provavelmente se deve a dois fatores: o maior teor de argamassa (α) e a maior relação água/materiais secos (H). Embora o concreto produzido pelo método do IPT não tenha atingido o valor alvo, obtendo abatimento de 5,5cm, ele permaneceu relativamente próximo do objetivo, especialmente em comparação ao método de O'Reilly.

É interessante observar que os métodos da ABCP e do IPT apresentaram o mesmo teor de argamassa, o que leva a crer que o concreto produzido pelo método do IPT não atingiu o abatimento planejado devido à considerável diferença na relação água/materiais secos entre os dois métodos, que possuíam H de 8,7 e 7,9% respectivamente.

Na Figura 4 são mostrados os resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos concretos produzidos.

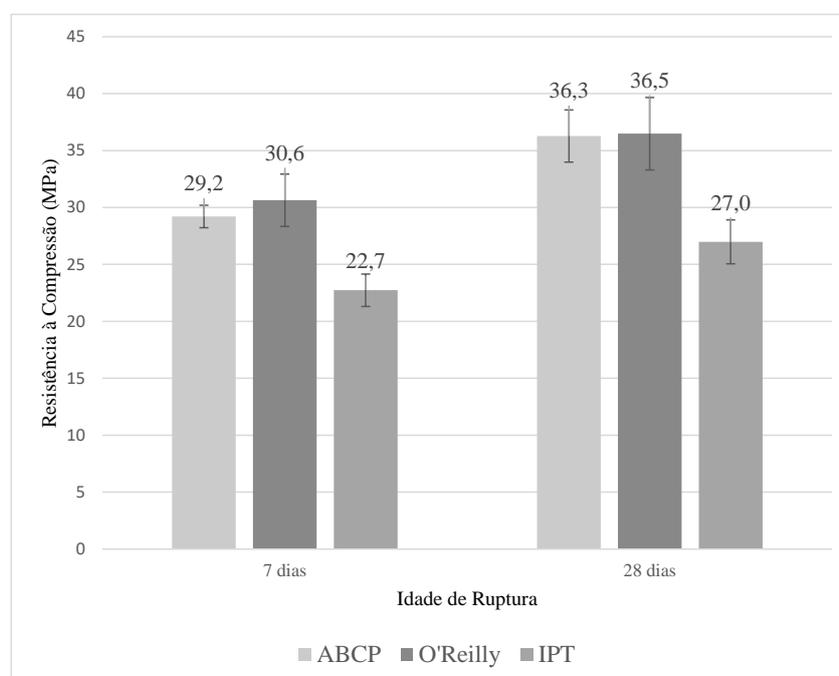


Figura 4 - Resistência à compressão dos concretos produzidos, aos 7 e 28 dias de idade.

Com base nos resultados apresentados na Figura 4 é possível perceber que a proximidade dos traços produzidos pelos métodos da ABCP e O'Reilly, conforme mostra a Tabela 8, se refletiu nos resultados de resistência mecânica à compressão axial (f_{cj}). Os valores de resistência obtidos por esses dois métodos não apresentaram diferença significativa entre si. Ambos os métodos produziram concretos com f_{c28} superior aos 31,6MPa requeridos para atender à premissa de um concreto com $f_{ck} = 25$ MPa e desvio padrão (S_d) de 4,0MPa. É interessante apontar que, para todos os concretos produzidos, o desvio padrão real permaneceu abaixo dos 4,0MPa recomendados pela NBR 12655:2015, na situação de produção realizada em ambiente laboratorial.

Entre as três situações avaliadas nesse estudo, o método do IPT foi o único a não satisfazer a premissa de $f_{c28} = 31,6$ MPa. Como já descrito anteriormente, a dosagem para atingir tal resistência aos 28 dias de idade teve que ser extrapolada, pois encontrava-se fora da curva contemplada pelas misturas experimentais, mostrada na Figura 3. No procedimento de

montagem do ábaco de dosagem desse método, não é possível prever quais resistências serão contempladas pela curva de dosagem. Sendo assim, o mais adequado teria sido efetuar novas misturas experimentais para ampliar a zona de cobertura do ábaco, permitindo uma dosagem mais fiel à realidade. Se for levado em consideração o desvio padrão real de produção, o valor de f_{ck} obtido é de cerca de 24MPa, relativamente próximo ao resultado-alvo.

De uma forma geral, cada um dos métodos avaliados nesse trabalho apresenta características próprias e que podem torná-los mais adequados a uma determinada situação. A agilidade proporcionada pelo método da ABCP, por exemplo, faz com que esse seja uma alternativa interessante para situações onde não há tempo hábil para montagem de ábacos ou uso de algum método mais elaborado, bastando apenas conhecer as características físicas dos agregados utilizados. No caso do método de O'Reilly, ele pode ter grande valor em regiões onde há pouca variedade de agregados disponível, logo, os procedimentos propostos para avaliação e busca de uma melhor compacidade em diferentes combinações de agregados/aglomerante auxiliarão a proporcionar um melhor desempenho no produto final com os materiais disponíveis. Por fim, o método do IPT é de bastante valor quando há tempo hábil para um estudo mais elaborado dos componentes do concreto, com a montagem de ábacos que permitem a dosagem partindo-se de diferentes parâmetros, bem como a boa exploração do potencial dos materiais utilizados.

Logo, a escolha do método a ser utilizado depende uma série de fatores que não são universais, como o contexto da situação, os objetivos do projeto, a localização geográfica, a disponibilidade de materiais, o tempo para atendimento, a tecnologia disponível para produção dos concretos, entre outros.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que o método de O'Reilly não ocasionou a redução esperada no consumo de cimento frente ao método da ABCP, devido às características dos agregados utilizados, que já apresentam bom desempenho conjunto. O método do IPT mostrou-se o mais eficiente em termos de otimização da performance mecânica dos materiais utilizados, devido ao traçado de curvas de dosagem próprias. Em termos de durabilidade, devem ser observadas as orientações da NBR 6118:2014 quanto às recomendações de relação água/cimento, mas esta pode ser reduzida lançando-se mão de aditivos, não devendo ser considerada fator limitante ao uso de nenhum dos métodos aqui estudados. Dessa forma, com os materiais disponíveis na região de Londrina, conclui-se que os métodos do IPT e da ABCP se apresentam como alternativas interessantes para dosagem de concretos convencionais para fins diversos, sendo que o segundo pode ser otimizado por meio do traçado de curvas de Walz próprias, explorando-se melhor o potencial dos componentes utilizados.

REFERÊNCIAS

- AHMED, M.; ISLAM, S.; NAZAR, S.; KHAN, R. A. *A comparative study of popular concrete mix design methods from qualitative and cost-effective point of view for extreme environment*. Arabian Journal for Science and Engineering, v. 41, n. 4, p. 1403-1413, 2016.
- ALHADAS, M. F. S. *Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738. *Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova*. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. NBR 5739. *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. NBR 6118. *Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. NBR 7211. *Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 9776. Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman*. Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 12655. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2015.

_____. *NBR NM 23. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2000.

_____. *NBR NM 45. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006.

_____. *NBR NM 53. Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR NM 67. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1998.

_____. *NBR NM 248. Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.

DONATELLO, S.; TYRER, M.; CHEESEMAN, C. R. *Comparison of test methods to assess pozzolanic activity*. *Cement & Concrete Composites*, v. 32, n. 2, p. 121-127, 2010.

CASTRO, A. L. *Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L.; NUNES, R. R. A.; MOURA, R. C. A. *O concreto como material de construção*. *Cadernos de Graduação*, v. 1, n. 3, p. 49-58, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 4 ed. São Paulo: Pini, 1997.

NUNES, F.W.G. *Resistência e módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PASINI, B. F.; VARGAS, A. *Avaliação experimental da utilização de concreto fresco após 150 minutos, adicionando aditivo para correção do abatimento*. *Universidade do Extremo Sul Catarinense*, n. 1, p. 1-19, 2015.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. *Dosagem dos concretos de cimento Portland*. In: *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: Ibracon, 2011.

ZERBINO, R.; BARRAGÁN, B. *Propriedades reológicas del hormigón auto compactable*. *Revista Concreto e Construções*, v. 47, p. 61-66, 2007.