

## Influence of the environment and loading age on SCC drying creep

### *Influência das condições do ambiente e idade de carregamento na fluência por secagem do CAA*



**A. C. MARQUES**<sup>a</sup>  
marques.ac@gmail.com

**T. N. BITTENCOURT**<sup>b</sup>  
tulio.bittencourt@poli.usp.br

**M. P. BARBOSA**<sup>c</sup>  
mbarbosa@dec.feis.unesp.br

#### Abstract

The creep in concrete is a phenomenon that occurs due the water movement within the concrete and it is influenced by several factors that act simultaneously. Some of these factors are the environmental conditions (relative humidity and temperature) to which the element or the specimen is submitted. This paper compares the experimental results from drying creep of specimens loaded at different ages and kept in a controlled environment (climatic chamber) versus those from an uncontrolled ambience. In addition, comparisons are made among the experimental results with those from prediction models available in the literature. From the results it can be noted that changes in humidity during the first month of testing have the greatest influence on creep and that concrete loaded at higher ages have lower creep. Regarding the prediction models, it was observed that the ACI and GL models are those that best anticipate creep occurrence.

**Keywords:** self-compacting concrete, drying creep, prediction models.

#### Resumo

A fluência é um fenômeno que ocorre devido à movimentação de água no interior do concreto e é afetada por vários fatores que agem simultaneamente. Dentre estes fatores estão às condições do ambiente (umidade relativa do ar e temperatura) ao qual o elemento, ou corpo de prova, está submetido. Neste trabalho são feitas comparações entre resultados experimentais de fluência por secagem de corpos de prova carregados em idades diferentes e mantidos em ambiente controlado (câmara climatizada) e não controlado. Além disso, são feitas comparações entre estes resultados com os fornecidos por modelos de previsão disponíveis na literatura. A partir dos resultados pode-se notar que alterações da umidade durante o primeiro mês de ensaio apresentam maior influência nas deformações e que concretos carregados com maiores idades apresentam menores deformações por fluência. Foi observado na comparação entre modelos de previsão que o modelo do ACI e GL melhor preveem a fluência.

**Palavras-chave:** concreto auto adensável, fluência por secagem, modelos de previsão.

<sup>a</sup> Department of Structure and Geotechnical Engineering, University of São Paulo, marques.ac@gmail.com, av. Professor Almeida Prado n.83 tv.2, Cidade Universitária, CEP05508-900, São Paulo-SP, Brazil;

<sup>b</sup> Department of Structure and Geotechnical Engineering, University of São Paulo, tulio.bittencourt@poli.usp.br, av. Professor Almeida Prado n.83 tv.2, Cidade Universitária, CEP05508-900, São Paulo-SP, Brazil;

<sup>c</sup> Department of Civil Engineering, São Paulo State University, mbarbosa@dec.feis.unesp.br, alameda Bahia n.550, Centro, CEP:15385-000, Ilha Solteira-SP, Brazil.

## 1. Introdução

A fluência basicamente consiste no aumento da deformação do elemento carregado quando é mantida constante a tensão sobre o elemento [1]. Esta carga externa mantida constante torna-se a força motriz para o movimento da água fisicamente adsorvida e da água retirada dos pequenos capilares. Assim, a deformação por fluência pode ocorrer mesmo com 100% de umidade relativa [2]. A fluência é normalmente classificada em fluência básica e fluência por secagem. A fluência básica é aquela que ocorre sem troca de umidade com o ambiente. Segundo Mehta e Monteiro [2], esta condição geralmente surge em estruturas de grande porte onde a retração por secagem pode ser desprezada. Já a fluência por secagem é a deformação adicional observada quando o concreto é submetido a um ambiente com umidade relativa inferior a 100%. Como o aumento gradual da deformação por fluência pode ser várias vezes maior do que a deformação no momento do carregamento, a fluência tem considerável importância nas estruturas. Ela afeta as deformações e as flechas e, muitas vezes, também a distribuição de tensões; mas, dependendo do tipo de estrutura, estes efeitos são variáveis. Para o concreto massa, ela é um parâmetro importante, pois o seu efeito resulta na relaxação das tensões de origem térmica oriundas do resfriamento do concreto. Já para o concreto protendido, ela contribui para a perda de protensão [3]. Os movimentos da umidade na pasta endurecida de cimento, que essencialmente são quem controla as deformações de retração por secagem e de fluência no concreto, são influenciados por vários fatores que interagem simultaneamente [2]. Dentre os fatores que influenciam nesta propriedade estão: o tipo de material e a dosagem, os aditivos e adições, a composição química do cimento e a finura, a umidade relativa do ar e a temperatura do ambiente, as condições de cura e conservação, a geometria do elemento de concreto, a idade de carregamento e a resistência do concreto. Neville [4] afirma que um dos fatores mais importantes que atuam sobre a fluência do concreto é a umidade relativa do ar que o envolve. Para a fluência, a umidade relativa afeta a secagem do concreto, sendo importante distinguir entre a secagem que ocorre

antes e depois do seu carregamento. A secagem da peça enquanto carregada, aumenta a fluência, isto é, introduz a fluência por secagem. Contudo, em peças de concreto que tenham atingido o equilíbrio higroscópico com o meio antes da aplicação da carga, a influência da umidade relativa é menor.

Com relação à temperatura, ela pode ter dois efeitos opostos sobre a fluência. Mehta e Monteiro [2] relatam que se uma peça de concreto é exposta a uma temperatura maior que a ambiente como parte do processo de cura antes de ser carregada, a resistência aumentará e a deformação por fluência será menor do que a de um concreto armazenado a uma temperatura mais baixa. Isso porque a temperatura acelera a hidratação, reduzindo a fluência. Por outro lado, a exposição à alta temperatura durante o período em que o concreto está sendo carregado pode aumentar a fluência. Em ensaios considerando a variação da umidade ao longo do tempo realizados em argamassa por Neville [5], os resultados mostram que a fluência é aumentada quando esta é exposta à variação de umidade relativa somente se o carregamento é aplicado antes da primeira secagem. A exposição da argamassa a umidade relativa alternando entre 50 e 70% apresenta fluência quase tão grande quanto a mantida em uma umidade relativa constante de 50% e muito maior que a da umidade relativa média de 60%. Isso sugere que, alternando a umidade relativa, a fluência será aumentada além daquela do menor limite de umidade. O mesmo autor também cita o estudo do comportamento do concreto exposto a variações da umidade relativa ao ar livre e protegido da chuva (variação de umidade de 60 a 90%), comparando-os com resultados de laboratório com corpos de prova mantidos a 50% de umidade. A partir dos resultados parece não haver diferença substancial na fluência ou na deformação total entre o local de exposição onde a umidade relativa variou de 60 a 90%, quando comparados aos corpos de prova mantidos em umidade constante de 50%. Portanto, é necessário ter cuidado na aplicação de resultados com umidade constante para aplicações em campo.

Já para a idade de carregamento, a fluência dos concretos carregados a baixas idades é maior nas primeiras semanas de carregamento em relação a concretos carregados a maiores idades. Esse comportamento é devido ao maior grau de hidratação dos concretos mais velhos, que apresentam estrutura interna mais compacta e menos água disponível [3]. Já para idades de carregamento superiores a 28 dias, a influência da idade é muito pequena [6]. Neste trabalho são feitas comparações entre resultados de fluência por secagem obtidos entre corpos de prova carregados em idades diferentes e mantidos em câmara climatizada (ambiente controlado) e em corpos de prova deixados em ambiente sem controle de umidade relativa do ar e temperatura ambiente. Além disso, são feitas comparações entre os resultados experimentais obtidos e modelos de previsão disponíveis na literatura.

## 2. Materiais e programa experimental

O concreto utilizado neste trabalho é um concreto auto adensável que foi caracterizado tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Os ensaios realizados no estado fresco foram: espalhamento, tempo de escoamento  $T_{500}$ , funil-V e caixa-L. Os ensaios realizados no estado endurecido foram: resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e fluência por secagem. O concreto foi feito com cimento do tipo CP-II-E-40 da Votorantim Cimentos Brasil S.A., brita 0 de origem granítica, brita 1 de

**Tabela 1 – Traço do concreto utilizado no trabalho**

Componentes	CAA
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	370,0
Areia de quartzo(kg/m <sup>3</sup> )	512,0
Areia de brita (kg/m <sup>3</sup> )	420,0
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	520,8
Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )	347,2
Água (l)	180,0
Superplastificante viscocrete 3535 (kg/m <sup>3</sup> )	2,59
Superplastificante Mira 94 (kg/m <sup>3</sup> )	2,40
a/c (kg/kg)	0,49
$f_{ck}$ (MPa)	50

Tabela 2 – Caracterização física dos agregados

Ensaio	Material			
	Areia de quartzo	Areia artificial	Brita 0	Brita 1
Dimensão máxima característica (mm)	0,60	2,40	9,50	19,0
Material fino passante #75(%)	1,40	3,10	0,50	0,80
Módulo de finura (%)	1,28	2,62	5,67	6,93
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,69	2,70	2,68	2,81
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,66	2,65	2,63	2,79
Massa específica saturada superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,67	2,66	2,64	2,80

origem calcária, areia quartzosa rósea e areia de brita. Os superplastificantes utilizados foram: o polifuncional Mira 94 da Grace Construction Products e o viscocrete 3535 da Sika S.A.. O traço utilizado é mostrado na Tabela 1 e a caracterização física dos agregados graúdos e miúdos encontra-se na Tabela 2. Na Figura 1 são mostradas as curvas granulométricas de todos os agregados utilizados.

O traço foi feito em massa e, para a sua confecção, foram utilizados os agregados previamente secos em estufa. O preparo do concreto e a moldagem dos corpos de prova para a caracterização do concreto foi feita no Laboratório de Estruturas e Materiais estruturais (LEM), da EPUSP. Logo após a mistura dos materiais na betoneira foram feitos os ensaios de caracterização no estado fresco.

Os ensaios de caracterização no estado fresco foram realizados de acordo com a NBR15823-2 [7], NBR15823-4 [8] e NBR15823-5 [9]. Os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade foram feitos de acordo com a NBR5739 [10], NBR7222 [11] e NBR8522 [12], respectivamente, para as idades de 7, 14, 28 e 49 dias. Foram moldados três corpos de prova para cada ensaio e para cada idade (totalizando 36 corpos de prova). O ensaio de fluência foi realizado de acordo com o prescrito pela NBR8224 [13] e foi dividido em dois grupos. O primeiro grupo foi carregado aos 14 dias e o segundo grupo foi carregado aos 49

dias. Na Tabela 3 é mostrada a quantidade de corpos de prova para cada grupo de ensaio de fluência por secagem.

Além das duas idades de carregamento, também foram feitos ensaios dentro e fora de uma câmara climatizada com umidade e temperatura controlada. A câmara climatizada mantém o ambiente interno constante com umidade e temperatura de 60±4% e 23±1°C, respectivamente.

### 2.1 Procedimentos adotados para o ensaio de fluência por secagem

O ensaio de fluência foi realizado em corpos de prova cilíndricos de dimensões 15x30cm. A instrumentação foi feita com extensômetro elétrico de imersão em concreto da marca KYOWA, modelo KM-120-120-H2-11W1M3. Embora os corpos de prova utilizados para o ensaio de fluência sejam semelhantes aos cilíndricos com dimensões de 15cmx30cm, as formas utilizadas para este ensaio apresentam algumas alterações em relação às usuais, pois para a realização do ensaio de fluência é necessário colocar discos metálicos nas extremidades do corpo de prova (15cm de diâmetro e 2cm de espessura). Portanto, foram feitas formas metálicas com dimensões 15x34cm, para que a altura do corpo de prova fosse mantida em 30cm.

Os discos metálicos são colocados nas extremidades do corpo de prova para garantir planicidade e uniformidade do carregamento aplicado. O disco superior é maciço e o disco inferior possui um

Figura 1 – Curva granulométrica dos agregados utilizados para a confecção do traço

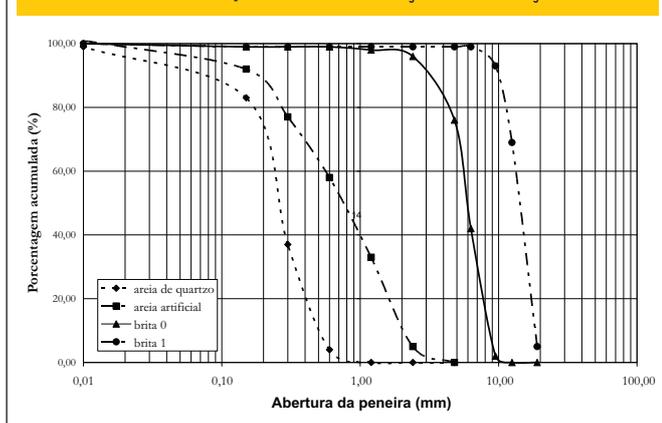


Tabela 3 – Quantidade de corpos de prova para o ensaio de fluência

Ensaio	Idade (dias)	
	14	49
Fluência por secagem	2	2
Fluência por secagem (fora da câmara climatizada)	2	2
Retração por secagem	1	1
Retração por secagem (fora da câmara climatizada)	1	1
<b>Total</b>	<b>12</b>	

Figura 2 – Forma bipartida para o ensaio de fluência



orifício e uma ranhura (como prescrito pela NBR8224 [13]) que possibilita a passagem do fio do extensômetro de imersão utilizado para a instrumentação. Além disso, para garantir sua fixação com o corpo de prova, o disco inferior apresenta um grampo metálico. Assim como o disco metálico, que possui alterações para a passagem do fio do extensômetro, a forma metálica é dotada de um orifício para a passagem do mesmo. Além disso, para facilitar o procedimento de instrumentação e desforma, estas são bipartidas. Na Figura 2, pode ser vista a forma utilizada para o ensaio. O procedimento adotado para a realização do ensaio iniciou-se pela instrumentação do corpo de prova, que é feita através da centralização e fixação do sensor no eixo longitudinal da forma. Depois de fechada a forma, passou-se uma camada de óleo em suas paredes internas para facilitar a desforma. Após a moldagem

Figura 3 – Acumuladores acoplados ao manifold para reduzir a variação de pressão

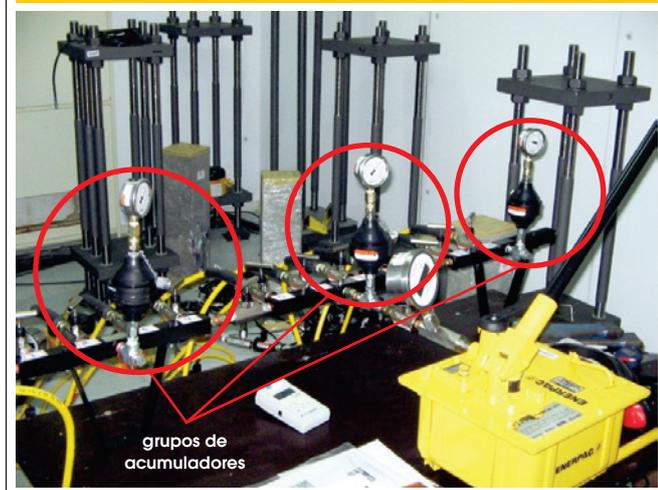


Figura 4 – Equipamento de carregamento dos corpos de prova externos



foi colocado o disco superior, ainda com o concreto fresco e feito o seu nivelamento feito com um nível de bolha. Estes procedimentos estão minuciosamente detalhados em Marques *et al.* [14]. Depois de moldados, os corpos de prova foram deixados dentro das formas até a data de ensaio (14 ou 49 dias). A desforma de cada grupo de corpos de prova foi feita somente na data de ensaio e o carregamento foi feito conforme prescrito pela NBR8224 [13], ou seja, a aplicação total da carga ocorreu em um período de 30s e antes do carregamento definitivo este foi precedido por dois carregamentos e descarregamentos consecutivos.

A carga aplicada tanto nos corpos de prova do primeiro grupo (14 dias) quanto a do segundo grupo (49 dias) foi fixada em 30MPa, que corresponde a 30% da tensão de ruptura do corpo de prova para a idade de 14 dias. Este valor foi fixado devido à limitação do sistema de aplicação de carga cuja tensão máxima permitida para ensaio é de 30MPa. A mesma carga foi aplicada nos corpos de prova do segundo grupo, pois no sistema utilizado, os acumuladores dentro e fora da câmara são compartilhados para cada conjunto por meio de uma régua de distribuição. Os sistemas de aplicação de carga utilizados dentro e fora da câmara climatizada podem ser vistos nas Figuras 3 e 4.

Como mencionado anteriormente, os corpos de prova passam por dois ciclos de carregamento e descarregamento antes da aplicação da carga definitiva. Portanto, admite-se como leitura da deformação inicial àquela obtida depois da retirada do segundo carregamento. Depois desta leitura inicial é feito o terceiro carregamento dos corpos de prova e, em seguida, uma leitura 30s depois da aplicação da terceira carga, (conforme prescrito na NBR8224 [13]). Como se dispunha de um equipamento de aquisição de dados dedicado exclusivamente para este ensaio, as medidas foram feitas no primeiro dia a cada 30s, sendo mantida a cada 1h a partir do segundo dia e mantida nesta taxa até o fim do ensaio.

De acordo com a NBR8224 [13], a deformação por fluência é dada pela subtração da deformação imediata e da deformação de um

Tabela 4 – Propriedades do CAA no estado fresco

Ensaio	Leitura	Limites designados por norma
Espalhamento (mm)	605	550 a 650 (Sf1)
Tempo de escoamento $T_{500}$ (s)	5	>2 (Vs2)
Caixa L ( $H_2/H_1$ )	0,8	$\geq 0,8$ (PI2)
Funil V (s)	9	9 a 25 (VF2)

corpo de prova de acompanhamento da deformação total. A deformação imediata é aquela lida 30s após a aplicação do terceiro carregamento.

### 2.2 Modelos de previsão de fluência

O intuito dos modelos de previsão é providenciar, aos projetistas, meios para estimar rapidamente as deformações por fluência e retração com precisão suficiente, usando parâmetros conhecidos [15]. Existem vários fatores que afetam a fluência e a dificuldade em prever com precisão a fluência do concreto encontra-se na interação dos diversos mecanismos físicos que são influenciados por tais parâmetros [16].

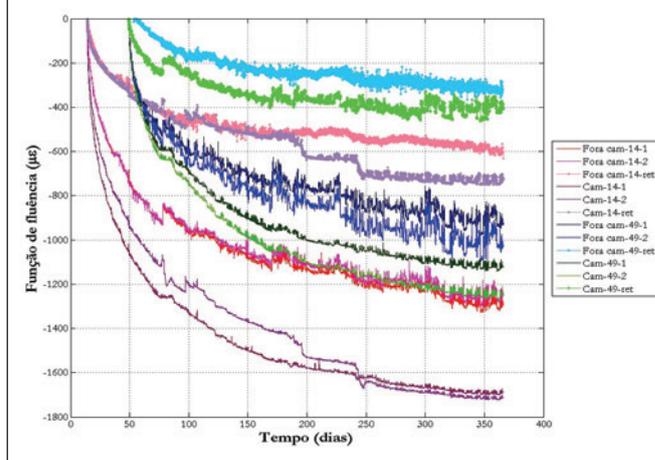
Por se tratar de ensaios de longa duração, muitas vezes estas propriedades não são medidas experimentalmente e, na falta de resultados experimentais para a fluência ou retração, pode ser feito uso de expressões encontradas em normas ou em outros modelos de previsão. Neste trabalho serão utilizados para a previsão da fluência os modelos dispostos na NBR6118 [17], EUROCODE 2 [18], ACI 209R [19], B3 [16] e GL [20]. Também serão comentados alguns fatores que podem interferir em seu uso para o CAA e os dados de entrada adotados para cada modelo.

A comparação entre resultados experimentais e os obtidos pelos modelos de previsão será feita pela função de fluência (J).

Todos os modelos de previsão analisados são válidos para uma carga aplicada de até 40% da resistência à compressão na idade de carregamento dos corpos de prova, com exceção do EC2, que permite uma tensão de até 45% da resistência característica do concreto e do B3 que pode ser usado para uma tensão de até 45% da resistência à compressão média do concreto.

Outro dado de entrada também utilizado é o abatimento. Este é usado apenas pelos modelos da NBR6118 [17] e ACI 209R [19]

Figura 5 – Deformações de fluência e retração por secagem para as duas datas de carregamento



e possui diferenças para a alimentação dos modelos. Segundo a NBR6118 [17], deve-se utilizar o abatimento do traço feito sem os aditivos, já no modelo do ACI 209R [19], considera-se o abatimento medido do traço feito. Neste trabalho é feita a comparação dos resultados experimentais com os fornecidos pelos modelos da NBR6118 [17] e ACI 209R [19] utilizando tanto o abatimento antes da adição do superplastificante quanto o depois da adição (5cm e 28cm, respectivamente).

Dentre os modelos analisados, o modelo B3 [16] é o que necessita de mais dados de entrada referente à composição do traço do concreto. As variações permitidas para a estimativa dos parâmetros dos materiais deste modelo está restrita aos seguintes valores:

- Resistência à compressão média ( $f_{cm}$ ):  $17 \leq f_{cm} \leq 70$  MPa;
- Relação água/cimento ( $a/c$ ):  $0,35 \leq a/c \leq 0,85$ ;
- Consumo de cimento ( $c$ ):  $160 \leq c \leq 720$  Kg/m<sup>3</sup>;
- Relação agregado/cimento em peso ( $ag/c$ ):  $2,5 \leq ag/c \leq 13,5$ .

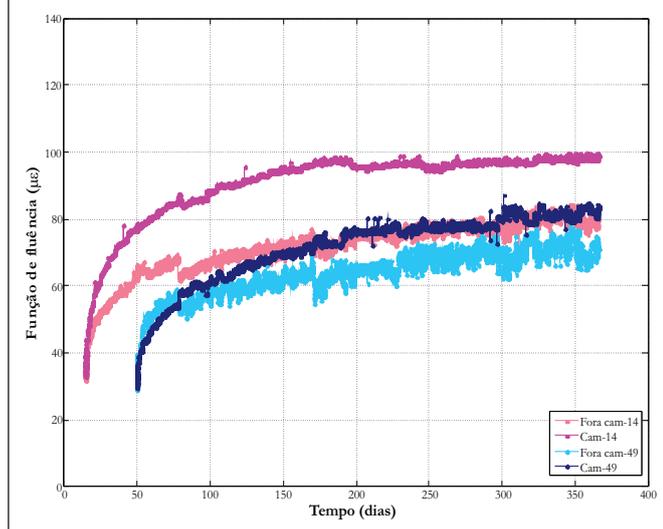
Já o modelo que necessita de menor quantidade de dados para sua alimentação é o GL [20], cuja única especificação em relação ao traço é o tipo de cimento utilizado, que é considerado em todos os modelos de previsão.

Embora nos modelos de previsão sejam sugeridas equações para a previsão do módulo de elasticidade a partir dos resultados de resistência à compressão do concreto, neste trabalho, foram uti-

Tabela 5 – Resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade do CAA

Idade (dias)	Propriedade mecânica		
	Resistência à compressão (Mpa)	Resistência à tração (Mpa)	Módulo de elasticidade (Gpa)
7	48,8	4,3	28,5
14	53,2	4,1	30,2
28	57,4	4,5	33,8
49	64,6	5,0	33,2

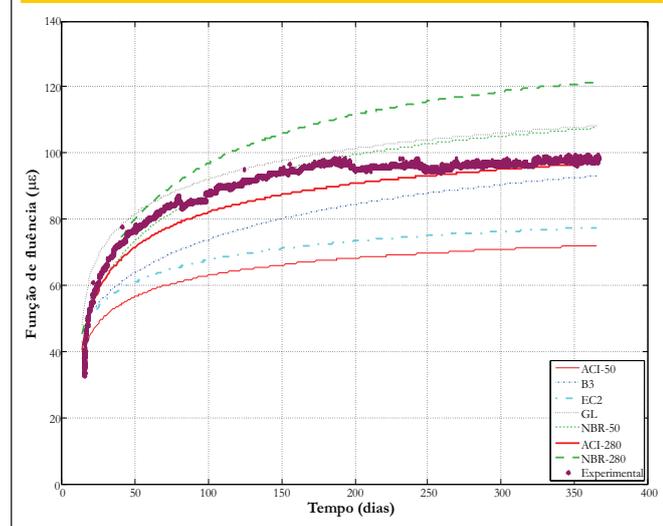
**Figura 6 – Função de fluência para os dois carregamentos**



lizados os resultados obtidos experimentalmente de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Além da compatibilização dos dados de entrada dos modelos, também é necessário estabelecer critérios para sua comparação. Um método difundido na literatura é o proposto por Bažant e Panula [16]. Os autores desenvolveram um coeficiente estatístico, utilizado para a comparação entre os resultados experimentais e os modelos de previsão ( $\omega_{B3}$ ). De acordo com Bažant e Baweja [16], é considerada como boa aproximação os modelos que possuem um coeficiente de até 25%.

**Figura 7 – Comparação entre os resultados experimentais e os dos modelos de previsão para os corpos de prova que permaneceram dentro da câmara climatizada e foram carregados aos 14 dias**



### 3. Resultados e discussões

Os resultados referentes aos ensaios de caracterização do concreto no estado fresco (espalhamento, tempo de escoamento  $T_{500}$ , caixa-L e funil-V) são mostrados na Tabela 4. Como podem ser vistos, os resultados de espalhamento, funil-V e caixa-L estão de acordo com os tipos de concretos prescritos pela NBR 15823-2 [7], NBR 15823-5 [9] NBR 15823-4 [8] para concretos de classe SF1, VS2, VF2 e PL2.

A caracterização no estado endurecido foi feita através de ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e fluência por secagem. A média do ensaio de três corpos de prova referentes aos três primeiros ensaios é mostrada na Tabela 5. Esta caracterização é feita para avaliar o comportamento do material ao longo do tempo e para fornecer dados para a alimentação dos modelos de previsão de fluência, utilizados neste trabalho.

Os ensaios de fluência por secagem e retração por secagem (corpos de prova de acompanhamento) foram feitos tanto em corpos de prova deixados dentro da câmara climatizada (umidade de  $60 \pm 4\%$  e temperatura de  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ ) quanto em corpos de prova fora da câmara climatizada (com variação de umidade e temperatura). A partir desta comparação é possível verificar a influência das deformações dos corpos de prova ao longo do tempo em relação a um ambiente controlado.

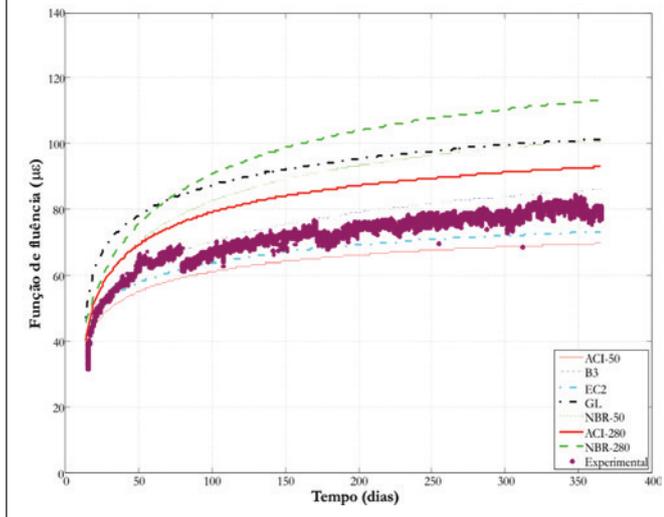
A nomenclatura adotada para os corpos de prova apresenta a seguinte ordem: condição de ensaio (umidade e temperatura constante – Cam ou variação de umidade e temperatura – Fora cam), idade de carregamento ou início da secagem (14 dias – 14 ou 49 dias – 49), número do corpo de prova de fluência (corpo de prova 1 – 1 ou corpo de prova 2 – 2).

As deformações medidas tanto para os corpos de prova de fluência por secagem quanto para os de retração por secagem podem ser vistos na Figura 5.

Como podem ser observadas na Figura 5, as deformações por fluência dos corpos de prova que foram carregados aos 14 dias, e que permaneceram dentro da câmara climatizada, possuem maior deformação total (aproximadamente  $2200 \mu\epsilon$ ) do que os corpos de prova que ficaram fora da câmara climatizada (aproximadamente  $1800 \mu\epsilon$ ). Esta diferença pode ser atribuída principalmente à umidade do ambiente, já que a temperatura média fora da câmara climatizada para o primeiro mês de carregamento dos corpos de prova foi de  $20^\circ\text{C}$ . Neste mesmo período, a umidade média do ambiente para o primeiro mês de ensaio foi de  $68\%$ , enquanto a umidade média durante o mesmo período dentro da câmara climatizada foi de  $60\%$ . Em relação aos resultados de fluência para o segundo carregamento, observam-se que os resultados dos corpos de prova dentro da câmara climatizada e fora da câmara climatizada estão próximos entre si, apresentando diferença de aproximadamente  $200 \mu\epsilon$ . Durante o primeiro mês de ensaio dos corpos de prova carregados aos 49 dias, a umidade do ambiente foi de  $64\%$ .

Comportamento semelhante pode ser observado na Figura 6, que apresenta as curvas experimentais para a função de fluência. Como mencionado anteriormente, durante o período do segundo carregamento a umidade relativa do ambiente em relação à câmara climatizada apresentou diferença de aproximadamente  $4\%$ , que está dentro do limite aceito de variação de umidade dentro da câmara climatizada. Isto refletiu nos resultados experimentais através da proximidade entre as curvas de deformação e coeficiente de fluência mostrados nas Figuras 5 e 6.

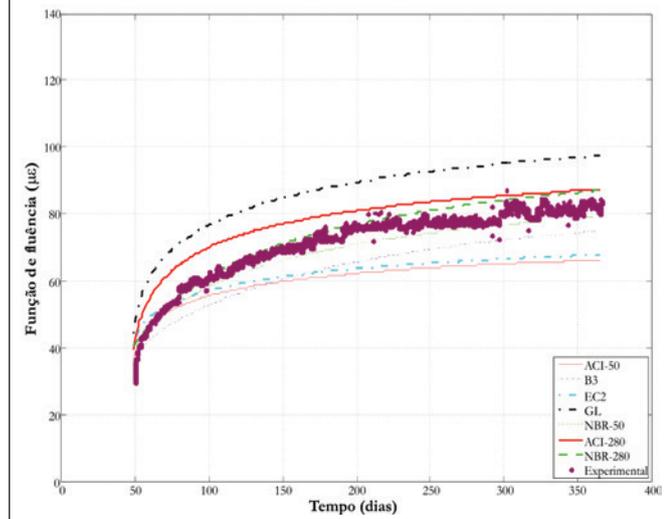
**Figura 8 – Comparação entre os resultados experimentais e os dos modelos de previsão para os corpos de prova que permaneceram fora da câmara climatizada e foram carregados aos 14 dias**



A obtenção da curva de fluência deu-se a partir da subtração da deformação do corpo de prova de retração por secagem da média dos corpos de provas carregados. Depois de obtida a curva experimental, foi feita a divisão dos resultados obtidos pelo carregamento aplicado aos corpos de prova, originando a função de fluência (J). Na Figura 6 são mostradas as curvas experimentais obtidas para os coeficientes de fluência dos corpos de prova carregados aos 14 dias (Cam-

14) e aos 49 dias (Cam-49). Também são mostradas as curvas referentes aos corpos de prova deixados dentro e fora da câmara climatizada. Como pode ser visto na Figura 6, os valores para a função de fluência aos 365 dias de ensaio referentes aos corpos de prova carregados aos 14 dias foi de  $99\mu\epsilon/\text{MPa}$  e  $78\mu\epsilon/\text{MPa}$  para os corpos de prova deixados dentro e fora da câmara climatizada respectivamente (ou seja, uma diferença de 21% entre os resultados). Já para os corpos de prova carregados com 49 dias, os valores obtidos foram de aproximadamente  $72\mu\epsilon/\text{MPa}$  e  $82\mu\epsilon/\text{MPa}$  para os que permaneceram fora e dentro da câmara climatizada, respectivamente. Isto mostra uma diferença de 12% entre os valores medidos. A maior proximidade entre os resultados obtidos para os corpos de prova carregados aos 49 dias já era esperada, visto que, a umidade relativa do ambiente dentro e fora da câmara climatizada foram mais próximas durante o início do ensaio. O menor valor para a função de fluência para o concreto mantido em ambiente com maior umidade relativa do ar já era esperado, pois, segundo Mehta e Monteiro [2] e Neville [5], espera-se que o aumento na umidade atmosférica retarde a taxa relativa de fluxo de umidade do interior para as superfícies externas do concreto. Comparando a função de fluência dos corpos de prova mantidos dentro da câmara climatizada e fora da câmara climatizada, observa-se que há diferença de 16% e 10% respectivamente entre os resultados referentes a 365 dias. A diminuição no valor da função de fluência para os corpos de prova carregados posteriormente já era esperada, em virtude do maior grau de hidratação e menor quantidade de água disponível (fator relatado por Neville [4]. Este comportamento também foi obtido experimentalmente por EQUIPE DE FURNAS [3], Kalintzis [22], Takeuti [23], entre outros. Os valores mais próximos da função de fluência para os corpos de prova mantidos fora da câmara climatizada ocorrem devido à maior umidade relativa do ambiente para o carregamento a 14 dias (68%), que diminuiu o valor da função de fluência para esta idade de carregamento.

**Figura 9 – Comparação entre os resultados experimentais e os dos modelos de previsão para os corpos de prova que permaneceram dentro da câmara climatizada e foram carregados aos 49 dias**



**Figura 10 – Comparação entre os resultados experimentais e os dos modelos de previsão para os corpos de prova que permaneceram fora da câmara climatizada e foram carregados aos 49 dias**

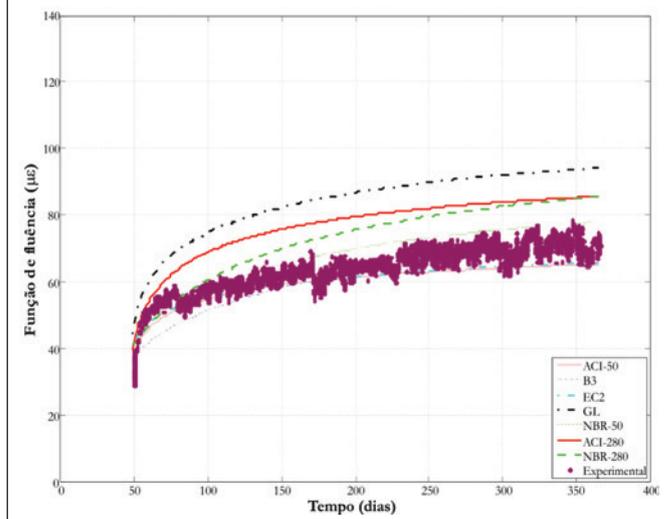


Tabela 6 – Dados de entrada utilizados para alimentar os modelos de previsão

Dados de entrada	ACI	EC2	B3	GL	NBR
Tipo de cimento	ASTM I	N	ASTM I	ASTM I	CP II
$f_{cm28}$ (Mpa)	57,4	-	57,4	57,4	-
$f_{ck}$ (Mpa)	-	49,4	-	-	49,4
Umidade relativa	60%	60%	0,6	0,6	60%
$t_0$ (idade de carregamento em dias)	14/49	14/49	14/49	14/49	14/49
$t_c$ (idade de fim de cura em dias)	-	-	14/49	14/49	-
$t_i$ (fim do ensaio em dias)	365	365	365	365	365
Espessura fictícia ( $h_0$ )	-	75 mm	-	-	0.075m
Relação V/S (mm)	37,5	-	37,5	37,5	-
Tensão aplicada (Mpa)	15	15	15	15	15
Temperatura (°C)	-	23	-	-	23
$E_{cm28}$ (Mpa)	33800	33800	33800	33800	33800
Abatimento (mm)	50/280	-	-	-	50/280
Quantidade de água ( $kg/m^3$ )	-	-	180	-	-
Quantidade de cimento ( $kg/m^3$ )	-	-	370	-	-
Teor de ar incorporado (%)	2	-	-	-	-
Agregado miúdo em relação ao total de agregados (%)	51,8	-	-	-	-
Agregado total ( $kg/m^3$ )	-	-	1800	-	-
Peso unitário do concreto ( $kg/m^3$ )	2300	-	-	-	-
Tipo de cura	úmida	-	-	-	-

Além da comparação entre os resultados obtidos experimentalmente, também foi feita a avaliação de alguns modelos de previsão disponíveis na literatura.

Nas Figuras 7, 8, 9 e 10 são feitas comparações entre as funções de fluência dos resultados experimentais e dos modelos de previsão. Na Figura 7 é mostrada a comparação dos resultados experimentais referentes à função de fluência dos corpos de prova do primeiro carregamento (14 dias) situados dentro da câmara climatizada e dos modelos de previsão. Na Figura 8 é feita a comparação entre a função de fluência dos resultados experimentais referentes ao carregamento de 14 dias e à função de fluência dos corpos de prova situados fora da câmara climatizada e a respectiva previsão dos modelos.

Como pode ser visto nas Figuras 7 e 8, vários modelos se aproximam dos resultados obtidos experimentalmente. A comparação

entre os resultados experimentais e os modelos de previsão é feita utilizando o coeficiente de variação ( $\omega_{B3}$ ).

Como os modelos de previsão não consideram a variação de umidade relativa ao longo do tempo foi estabelecido como dado de entrada nestes modelos a umidade relativa média referente ao primeiro mês do ensaio.

Na Tabela 6 são mostrados os dados de entrada utilizados para cada modelo de previsão.

A mesma comparação com os modelos de previsão e os resultados dentro e fora da câmara climatizada foi feita para os corpos de prova carregados aos 49 dias. Nas Figuras 9 e 10 são mostradas respectivamente as curvas experimentais e dos modelos de previsão para os corpos de prova mantidos dentro e fora da câmara climatizada.

Na Tabela 7 são mostrados os coeficientes de variação ( $\omega_{B3}$ ) obtidos para todos os modelos de previsão considerados para cada

Tabela 7 – Coeficiente de variação dos modelos de previsão e resultados experimentais

Modelo	$\omega_{B3}$ 14D-dentro da câmara	$\omega_{B3}$ 14D-fora da câmara	$\omega_{B3}$ 49D-dentro da câmara	$\omega_{B3}$ 49D-fora da câmara	$\omega_{all}$
ACI-50	28	12	33	16	24
ACI-280	5	16	14	10	12
B3	12	6	30	14	18
Ec2	23	8	32	16	22
GL	7	28	8	20	18
NBR-50	6	24	24	8	18
NBR-280	17	38	19	9	23

idade de carregamento e condição do ambiente. Também é mostrado o coeficiente geral de variação dos desvios dos modelos, proposto por Bažant e Baweja [16].

Considerando como valores aceitáveis erros de até 25% para o coeficiente  $\omega$ , pode ser observado na Tabela 7 que, embora alguns modelos de previsão não tenham sido adequados para prever o comportamento dos corpos de prova mantidos em câmara climatizada e carregado aos 49 dias, de um modo geral todos mostraram-se adequados para a previsão desta propriedade.

Dentre os modelos analisados, foi observado que a maioria apresenta boa previsão em relação aos resultados experimentais ( $\omega_{B3}$  de aproximadamente 18%). Entretanto, são necessárias mais comparações entre resultados experimentais de outros traços de concretos auto-adensáveis, com variação do tipo de cimento e proporção e tipos de agregados com os modelos de previsão, para que se possa confirmar se eles podem ser utilizados para concretos auto-adensáveis.

#### 4. Conclusões

Pode ser observado a partir dos resultados experimentais que:

- Em relação aos resultados referentes à caracterização do CAA, no estado fresco, todos os resultados mostraram-se de acordo com os limites estabelecidos pela norma. O concreto utilizado pode ser classificado como SF1, VS2, VF2 e PL2;
- Verificou-se que a variação da umidade durante o primeiro mês de ensaio é significativa para o ensaio de fluência por secagem. Esta interferência é atribuída à maior disponibilidade de água para movimentação nas primeiras idades;
- Os corpos de prova carregados na idade de 49 dias apresentaram menores resultados para a função de fluência. Isto ocorre devido ao maior grau de hidratação do concreto na idade de 49 dias e a menor quantidade de água disponível.
- Todos os modelos de previsão estudados conseguiram prever a fluência do CAA analisado. Dentre os modelos de previsão utilizados, a maioria apresentou coeficientes  $\omega_{B3}$  da ordem de 18%;
- Ainda é necessária a realização de ensaios com diferentes traços de CAA variando o tipo de cimento, tipo e proporção de agregado e adições para melhor verificação se os modelos de previsão são adequados para este tipo de concreto.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Engemix pelos materiais que foram disponibilizados para a moldagem dos corpos de prova e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro.

#### 6. Referências bibliográficas

- [01] Husni, R.; Benítez, A.; Manzelli, A.; Macchi, C.; Charreau, G.; Risetto, J.; Luco, L. F.; Guittelman, N.; Morris, W. Ações sobre as estruturas de concreto. In: HELENE, P. Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto. Red Rehabilitar, 2005. 1, p.37-104.
- [02] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. Concreto – estrutura, propriedades e materiais. PINI, São Paulo, 2008.
- [03] Equipe de FURNAS, Laboratório de concreto, Departamento de apoio e controle técnico, Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo. Editor: Walton Pacelli de Andrade, PINI, São Paulo, 1997.
- [04] Neville, A. M. Propriedades do concreto. São Paulo, PINI, 828p., 1997.
- [05] Neville, A. M.; Dilger, W. H., Brooks, J. J. Creep of plain concrete. London, New York, Construction Press, Estados Unidos, 361p., 1983.
- [06] Neville, A. M. Creep of concrete: plain, reinforced, and prestressed. North-Holland Publishing Co, 662p., 1970.
- [07] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto auto adensável Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams: NBR15823-2, 2010.
- [08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto auto adensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa –L: NBR15823-4, 2010.
- [09] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto auto adensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil –V: NBR15823-5. 2009.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ensaio de compressão de corpos de prova de concreto cilíndricos – Método de Ensaio: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: NBR 7222. Rio de Janeiro, 1994.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão: NBR 8522. Rio de Janeiro, 2008.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da fluência – Método de Ensaio: NBR 8224. Rio de Janeiro, 1983.
- [14] Marques et al. Procedimentos de Ensaio de Fluência para Corpos-de-Prova de Concreto com Extensômetro Elétrico de Deformação. In: 50º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Salvador, 200, CD-ROM.
- [15] Rüsçh, H.; Junqwrth, D.; Hilsdorf, H. K. Creep and shrinkage: theirs effect on the behavior of concrete structures. New York: Springer-Verlag, 284p., 1983.
- [16] Bažant, Z.P., Baweja, S., Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures (Model B3), In: AlManasseer, A., (Ed.), Creep and Shrinkage of Concrete, ACI Special Publication, (extended and improved version of BAŽANT and BAWEJA, 1995), 2000.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento: NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003.
- [18] EC2 - Eurocódigo 2. Projeto de estruturas de betão - parte 1: Regras gerais e regras para edifícios, 2004.
- [19] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 209R-92. Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures. ACI 1992.
- [20] Gardner, N.J., Lockman, M.J. Design provisions for

- drying shrinkage and creep of normal-strength concrete, *ACI Materials Journal*, 98(2), p.159-167, 2001.
- [21] GARDNER, N.J., Comparison of predictions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete. *Can. J. Civ. Eng.* 31, p. 767-775, 2004.
- [22] Kalintzis, C. A. A. Estudo da fluência do concreto de elevado desempenho. – EPUSP – Escola Politécnica de São Paulo - Dissertação de mestrado - São Paulo, 2000.
- [23] Takeuti, A. R. Comportamento resistente imediato e ao longo do tempo de pilares reforçados por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 276p. São Carlos, 2003.