

Resultados experimentais de vários anos pesquisando as propriedades mecânicas instantâneas e diferidas dos concretos de baixo até alto desempenho, utilizando corpos-de-prova e vigas



**Gilberto
Carbonari¹**



**André Campos de
Moura²**



**Ana C.P. dos
Santos²**



**Rodrigo Fabris
Caleffi³**

RESUMO

As deformações de longa duração do concreto têm uma influência significativa na durabilidade das estruturas, especialmente em vigas e lajes de grandes vãos, onde as deformações podem afetar a vida útil da estrutura. Se a estrutura for protendida, as deformações de longa duração provocam perdas na força de protensão, diminuindo a sua rigidez, conseqüentemente aumentando ainda mais a deformação. Com o objetivo de minimizar estes efeitos estruturais e aumentar a durabilidade foram ensaiadas cinco séries de vigas à fluência utilizando concretos desde baixa até alta resistência à compressão (15, 35, 45, 65 e 100 MPa). Para cada tipo de concreto, e após uma cura úmida de 28 dias, foram carregadas duas vigas a 40% da carga última, uma exposta a secagem e a outra selada externamente com parafina e papel alumínio, armadas apenas na parte inferior (sem estribos e armadura de compressão). Para obter a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, foram utilizados corpos de prova cilíndricos normalizados (15 cm de diâmetro e 30 cm de altura). Para medir a flecha instantânea e a deformação de fluência dos concretos foram utilizadas vigas armadas, isostáticas, com seção transversal de 10x15 cm e 180 cm de comprimento. Observou-se que existe uma grande disparidade na previsão do módulo de elasticidade entre as deferentes normas técnicas, e que o modelo do CEB é o mais próximo dos valores medidos experimentalmente. Além disso, os ensaios mostram que à medida que se aumenta a resistência à compressão do concreto diminuem sensivelmente as deformações de longa duração. A simples selagem da superfície externa das vigas reduz significativamente também as deformações de longa duração. Isso sugere que é possível aumentar a durabilidade das estruturas submetidas à fluência com uma simples impermeabilização externa e/ou com a utilização de concretos de mais alto desempenho.

PALAVRAS-CHAVE

Propriedades Mecânicas, Instantâneas, Diferidas, Concretos de Baixo a Alto Desempenho.

¹ Universidade Estadual de Londrina-UEL, Professor do Departamento de Estruturas, Londrina, PR, Brasil. carbonar@uel.br

² Universidade Estadual de Londrina, Ex-Bolsista do CNPq, Doutorando(a) na UPC - Barcelona, Espanha.

³ Universidade Estadual de Londrina, Ex-Bolsista do CNPq, Londrina, PR, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

O comportamento mecânico de longa duração (fluência e retração) do concreto tem influência significativa na durabilidade de estruturas de concreto, tanto em vigas como em lajes de grande vão, especialmente em pontes. Por outro lado, se estas estruturas forem protendidas, as deformações de fluência do concreto provocam um incremento nos deslocamentos verticais da estrutura com o tempo em função das perdas das forças de protensão nos cabos. Atualmente, há uma tendência para a melhora do desempenho das estruturas de concreto relacionado com a resistência mecânica, com a durabilidade, com a economia, com o meio ambiente, etc. Essas alterações nas propriedades do concreto estão associadas às mudanças das características da matriz, da interface entre a matriz e os agregados, e diretamente relacionadas com a redução da relação água/cimento, com a utilização de aditivos químicos (superplastificante) e com as adições minerais (sílica ativa).

Com o objetivo de minimizar estes efeitos indesejados nas estruturas, e aumentar a durabilidade das mesmas, neste trabalho foram ensaiadas cinco séries de vigas isostáticas à fluência, utilizando concretos cuja resistência a compressão variam de baixa até alta resistência (15, 35, 45, 65 e 100 MPa). Para caracterizar experimentalmente os concretos, foram submetidos corpos-de-prova a tensões normais de compressão com a finalidade de obter a resistência à compressão (f_c), o coeficiente de Poisson, e o módulo de elasticidade (E).

Este artigo é consequência de estudos prévios realizados por Carbonari (1996) na Tese de Doutorado e de pesquisas posteriores desenvolvidas na Universidade Estadual de Londrina.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para caracterizar experimentalmente os concretos, foram submetidos corpos-de-prova a tensões normais de compressão com a finalidade de obter a resistência à compressão (f_c), o coeficiente de Poisson, e o módulo de elasticidade (E); e vigas de concreto armado à flexão para obter os deslocamentos instantâneos e de longa duração.

2.1 Corpos-de-prova e vigas ensaiadas

Para a caracterização mecânica dos concretos foram utilizados dois tamanhos de corpos-de-prova cilíndricos: 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para os concretos de alto desempenho (65 MPa e 100 MPa de resistência à compressão); e com 15 cm de diâmetro e 30 de altura para os concretos de baixo e médio desempenho (15, 35 e 45 MPa).

Para a determinação do comportamento diferido (fluência) foram utilizadas nos ensaios vigas com concretos de baixa até alta resistência, de seção transversal retangular com 10 cm de largura, 15 cm de altura e vão livre entre apoios de 180 cm. As armaduras são dispostas na face inferior, compostas por duas barras de aço de diâmetro de 10 mm cada, conforme indicado na Fig. 1.

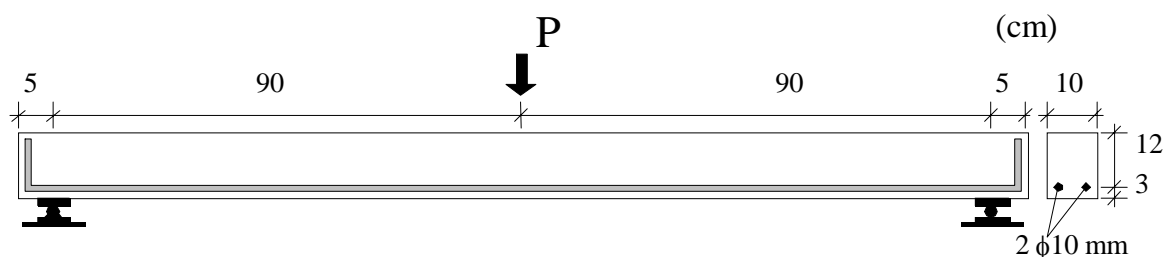


Figura 1. Detalhe das vigas de concreto armado.

As vigas foram projetadas para avaliar o efeito único da fluência do concreto comprimido, através da

evolução do deslocamento vertical máximo no meio do vão da viga durante o ensaio. Para cada tipo de concreto foram fabricadas duas vigas; uma selada com parafina e papel alumínio e a outra não selada, permitindo a análise da influência da secagem do concreto nas deformações por fluência.

Optou-se por utilizar uma viga isostática bi-apoiada para fazer os ensaios de fluência devido a maior simplicidade experimental. Após a moldagem, as vigas foram submetidas a um processo de cura em câmara úmida por 28 dias e posteriormente colocadas ao tabuleiro da mesa de reação do sistema de aplicação de carga sobre dois apoios formados por chapas e rótulas de aço, constituindo-se em estrutura isostática, conforme se descreve à continuação.

A carga P aplicada nas vigas ensaiadas à fluência corresponde a uma tensão normal máxima na fibra comprimida de 40% da resistência à compressão obtidos nos corpos-de-prova dos concretos.

2.2 Sistema de aplicação das cargas

O sistema de aplicação de carga, mostrado na Fig. 2, consiste na utilização de uma viga alavanca (C) que aplica na viga de ensaio uma carga majorada do peso dos blocos de concreto (posição E). Além disso, este sistema de carga tem a vantagem de manter a carga constante durante o ensaio de fluência da viga. Outras informações sobre o sistema de carga abaixo podem ser obtidas em Carbonari et al. (2003).

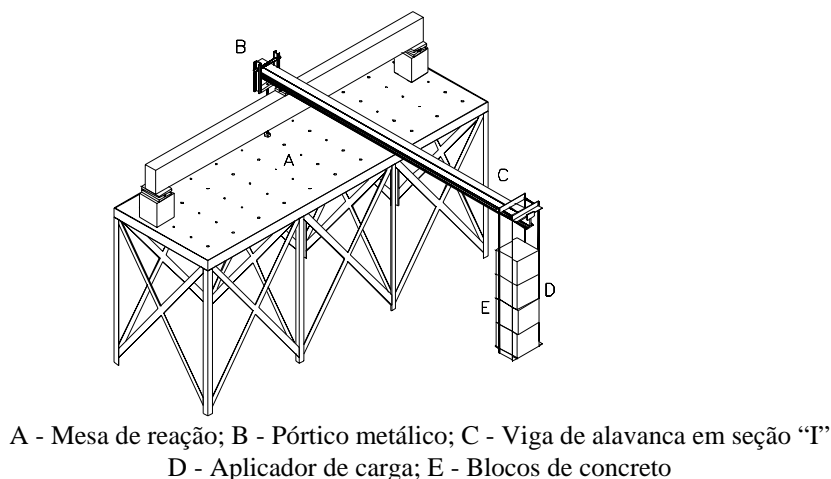


Figura 2. Sistema de aplicação de carga.

Aparelhos medidores são instalados nos apoios extremos e no meio do vão da viga, sendo estes monitorados através de leituras periódicas, descrevendo todo o comportamento de deformação lenta da viga ao longo do ensaio.

Para a determinação da carga aplicada nas vigas de ensaio considera-se o peso próprio dos elementos C e D e os blocos E a serem colocadas.

2.3 Dosagem dos concretos

As dosagens dos concretos das vigas foram realizadas seguindo o método de dosagem desenvolvido por Toralles-Carbonari (1996), conforme o Quadro 1, buscando atingir a resistência à compressão esperada aos 28 dias, necessária à execução dos ensaios de fluência.

Quadro1. Dosagem dos concretos

Componentes	15 MPa	35 MPa	45 MPa	65 MPa	100 MPa
Cimento (kg/m ³)	260	433	445	428	450
Areia (kg/m ³)	753	625	735	870	866
Brita 1 (kg/m ³)	1187	1145	1015	870	1017
Água (litros/m ³)	198	195	200	145,2	139
Sílica Ativa (kg)	-	-	-	44 (Silmix)	45 (Silmix)
Superplast. (L/m ³)	-	-	-	5,64 (Daracem)	5,1 (Glenium)
Slump (mm)	140	110	94	170	120

3. RESULTADOS E ANÁLISE

3.1 Coeficiente de fluência

Com relação ao coeficiente de Poisson, os valores medidos na Fig. 3 indicam valores ~0.20, conforme as normas sugerem, mas, com uma tendência de aumento com o acréscimo da resistência à compressão do concreto, para limites de tensão de $0.4 f_c$.

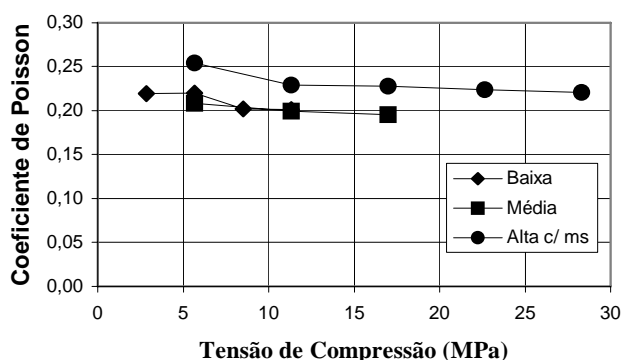


Figura 3 – Evolução do Coeficiente de Poisson com a tensão aplicada.

3.2 Módulo de elasticidade

Para obter experimentalmente o módulo de elasticidade foi aplicada uma tensão de até 40% da resistência à compressão (f_c) do concreto em dois corpos-de-prova para cada tipo de concreto. As deformações axiais e transversais foram medidas utilizando dois extensômetros elétricos de 5 cm de comprimento em cada direção. Os resultados medidos nos ensaios de fluência das vigas deste trabalho e os previstos pelos diversos modelos existentes estão mostrados no Quadro 2.

Quadro 2 - Módulo de elasticidade previsto pelos modelos e medido experimentalmente (MPa)

Normas	Modelo de previsão do E_{ci}	15 MPa	35 MPa	45 MPa	65 MPa	100 MPa
ACI 318	$E_c = 4.730 f_c^{1/2}$	18.319	27.983	31.729	38.134	47.300
Norueguesa	$E_c = 9.500 f_c^{0,3}$	21.407	27.602	29.764	33.235	37.820
Francesa	$E_c = 12.000 f_c^{1/3}$	29.595	39.253	42.683	48.249	55.699
EC2	$E_c = 9.500 f_c^{1/3}$	23.429	31.075	33.791	38.197	44.095
CEB90	$E_c = 9.980 f_c^{1/3}$	24.613	32.645	35.498	40.127	46.323
NB-1/1978	$E_c = 6.600 f_c^{1/2}$	25.562	39.046	44.274	53.211	66.000
NB-1/2003	$E_c = 5.600 f_{ck}^{1/2}$	19.155	31.530	36.162	43.987	55.068
Medidos	-	24.134	31.734	34.756	39.600	44.411

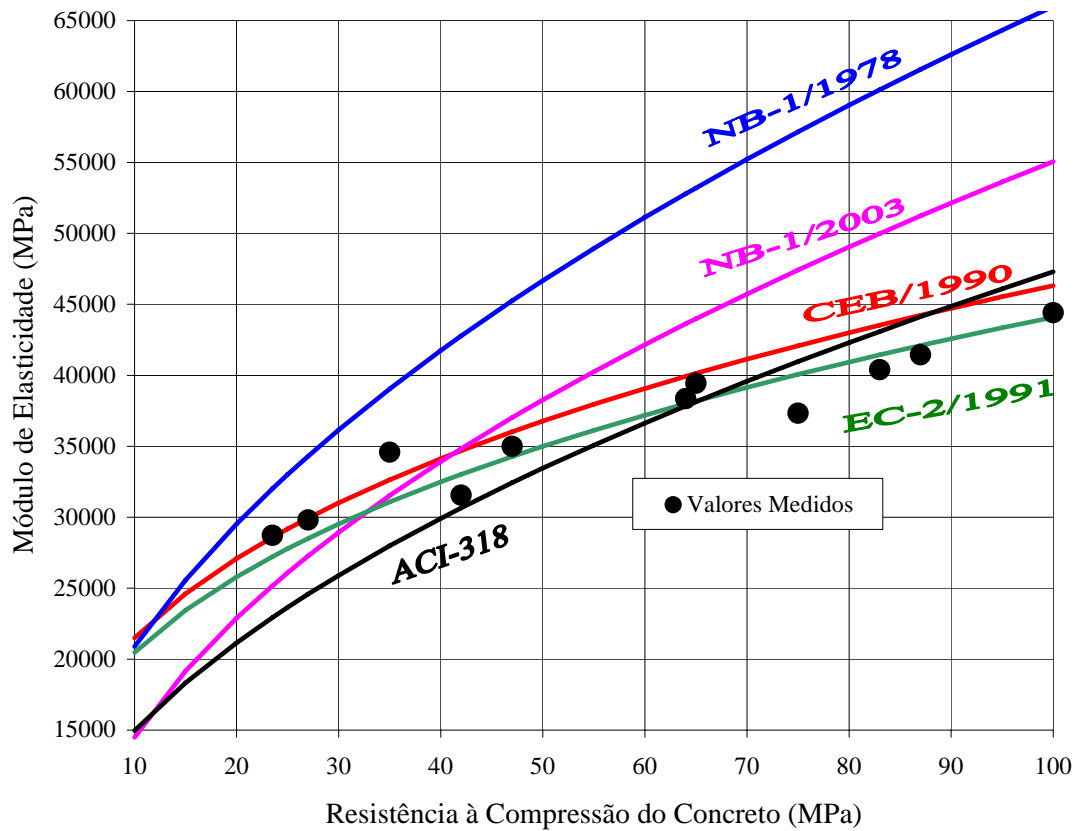


Figura 4. Comparação entre os módulos de elasticidade medidos e os modelos de previsão.

Agregando estes resultados com os anteriores obtidos pelo autor durante a tese de doutoramento (Carbonari, 1996), é possível comparar os valores experimentais com as previsões das normas técnicas, conforme indicados na Fig. 4.

Os valores medidos sugerem que os modelos propostos pelo CEB MC-90 (1993) e pelo EC-2 (1991) são os que melhor prevêm o módulo de elasticidade do concreto em função da sua resistência à compressão, desde baixa até alta resistência. O modelo do ACI-318, a NB-1 (1978) e a nova proposta NB-1 (2003) não apresentaram boa previsão em relação aos valores medidos. Os resultados obtidos indicam que a previsão do módulo de elasticidade seria função da raiz cúbica da resistência à compressão do concreto, conforme o CEB MC-90 (1993) e o EC-2 (1991), e não em função da raiz quadrada.

3.3 Deformação de fluência

Uma estrutura de concreto em carga está sujeita a um estado tensional de compressão que provoca deformação lenta progressiva com o tempo. Esse fenômeno denomina-se de fluência. Neste trabalho, essencialmente experimental, os deslocamentos medidos nas vigas ensaiadas são transformados em coeficientes de fluência total na duração de carga t , calculados através da Eq. (1).

$$\varphi(t) = \frac{Desl.Total(t) - Desl.Inicial(t_0)}{Desl.Inicial(t_0)} \quad (1)$$

O deslocamento vertical inicial é medido no momento da colocação da carga na viga, e pode ser calculado mediante modelos de comportamento teóricos. Neste trabalho foram utilizadas as equações de Branson (1977) para comparar com os valores medidos experimentalmente, descritas a seguir.

3.3.1 Deslocamento vertical instantâneo das Vigas

Os elementos estruturais de concreto armado submetidos à flexão são projetados com a rigidez necessária para evitar que os deslocamentos verticais possam afetar as condições de serviço dos mesmos, ou de outras partes da estrutura. Quando não se tem a possibilidade de determinar os deslocamentos verticais experimentalmente, poderá ser utilizado um método simplificado, conforme se descreve a seguir.

O método geral de cálculo dos deslocamentos verticais consiste em estabelecer a lei de variação da curvatura do elemento, determinando depois a deformada com dupla integração. A expressão da curvatura é, nos elementos à flexão:

$$a'' = (|\epsilon_s| + |\epsilon_s|) / d \quad (2)$$

Onde ϵ_s e ϵ_s são respectivamente as deformações de alongamento do aço e de encurtamento do concreto; d é a altura útil da seção transversal.

Para o cálculo dos deslocamentos instantâneos são utilizadas as equações de Branson (1977), onde o momento de inércia equivalente da seção transversal é:

$$I_e = (M_f / M_a)^3 I_b + [1 - (M_f / M_a)^3] I_f \leq I_b \quad (3)$$

Sendo:

M_f : Momento nominal de fissuração da seção, calculado mediante a seguinte expressão:

$$M_f = f_{cf} I_b / y_l$$

f_{cf} : Resistência à flexo-tração do concreto, podendo-se adotar: $f_{cf} = 0,8 (f_{ck}^2)^{1/3}$ (tanto f_{cf} quanto f_{ck} em kgf/cm²)

y_l : distância do centro de gravidade da seção transversal da seção bruta (considerando o concreto não fissurado e não considerando as armaduras) até a fibra extrema à tração.

M_a : Momento fletor aplicado na seção transversal no estado de carga que se pretende calcular o deslocamento vertical.

I_b : Momento de inércia da seção homogeneizada em relação a linha neutra que passa pelo centro de gravidade da seção, considerando a armadura e o coeficiente de equivalência $n = E_s / E_c$.

E_s : Módulo de elasticidade do aço.

E_c : Módulo tangente de deformação do concreto na idade de carga do elemento.

I_b : Momento de inércia da seção fissurada, desprezando a zona do concreto submetida à tração e homogeneizando as armadura pelo fator $n = E_s / E_c$.

Se $M_a \leq M_f$ se adotará $I_e = I_b$ (para vigas simplesmente apoiadas, que é o caso deste trabalho).

Para mostrar a eficiência do método de Branson (1977) para o cálculo do deslocamento vertical instantâneo, na Fig. 5 estão indicadas as curvas teóricas e os pontos experimentais de duas vigas armadas de concreto de alto desempenho (100 MPa).

Observa-se que os deslocamentos verticais teóricos, calculados segundo Branson (1977), estão muito próximos dos medidos experimentalmente. Além disso, verifica-se que um comportamento similar tanto no estado fissurado como não fissurado.

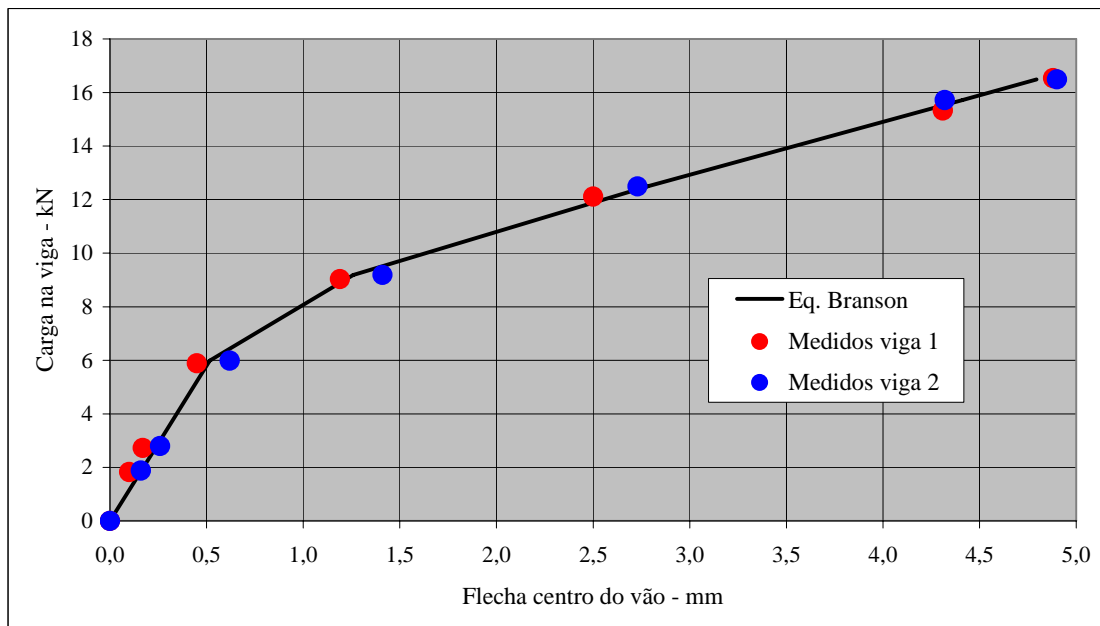


Figura 5. Evolução dos deslocamentos medidos e calculados nas vigas armadas ($f_c=100$ MPa).

3.3.2 Coeficientes de fluência das vigas

Para ilustrar os efeitos analisados, na Fig. 6 estão indicados os valores calculados dos coeficientes de fluência em função dos deslocamentos instantâneos e de longa duração medidos nas vigas de concreto com 15 MPa, selada e não selada.

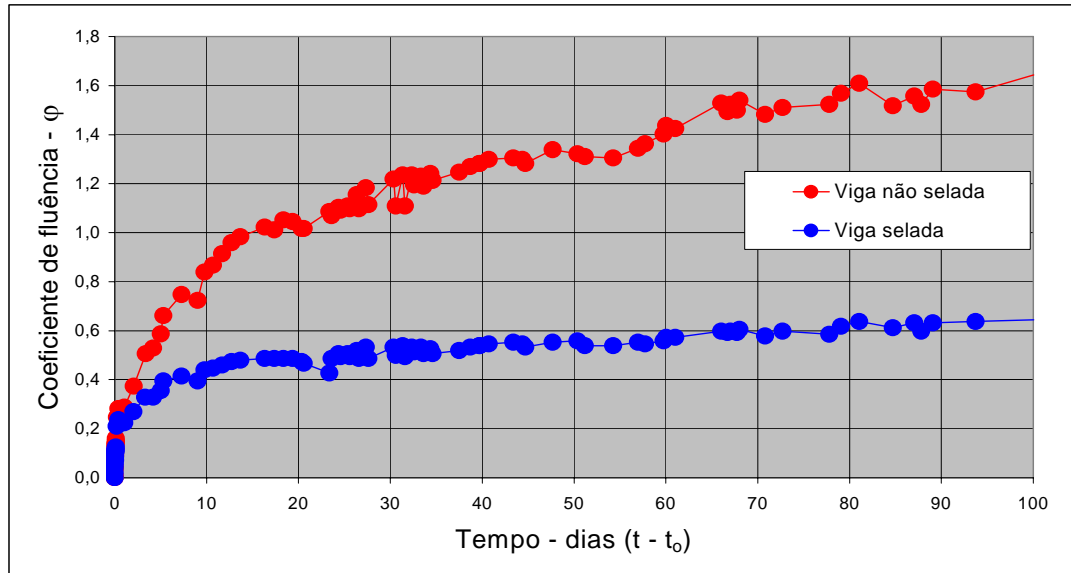


Figura 6. Evolução do coeficiente de fluência das vigas para o concreto de 15 MPa.

Os resultados indicaram que para o mesmo concreto, a selagem externa realizada antes do carregamento das vigas de fluência reduz significativamente os deslocamentos verticais de fluência.

Um dos fatores que justificam este resultado seria pelo fato da água que fica mantida no interior do concreto por meio da selagem ser incompressível. Por outro lado, os vazios deixados pela secagem do concreto são compressíveis e deformáveis, inclusive para os concretos de menor relação água/cimento (de maior resistência à compressão).

3.3.3 Extrapolação do coeficiente de fluência para tempo infinito

Em princípio, os ensaios de fluência deveriam ter um longo período de duração, contudo, Bazant e Baweja (1994) sugerem um período de ensaio reduzido, em torno de 90 dias, suficientes para fazer uma previsão teórica para idades superiores de carga. A partir dos valores experimentais, pode-se determinar curvas matemáticas obtidas por regressão que melhor se ajustem aos valores medidos.

Para obter o comportamento para idades superiores de carga é necessário definir uma função matemática que permita uma extrapolação dos valores medidos experimentalmente. Para isso, são utilizados modelos matemáticos capazes de relacionar “fielmente” estes parâmetros de origem experimental com o tempo. Neste sentido, foi utilizada uma função do tipo hiperbólica, similar a utilizada pelo CEB MC-90 (1993), entre outros, para representar o coeficiente de fluência com a duração de carga, conforme se observa na Eq. (4).

$$\varphi = \left[\frac{(t - t_o)}{\beta_H + (t - t_o)} \right]^b \varphi_\infty \quad (4)$$

onde:

- t e t_o são a idade do concreto desde a sua fabricação e a idade do concreto no momento da aplicação da carga, respectivamente,
- b é o coeficiente resultante do ajuste aos valores experimentais,
- φ_∞ é o valor teórico do coeficiente de fluência a tempo infinito ajustado na regressão,
- β_H é o parâmetro definido pelo modelo do CEB MC-90 (1993), mediante a Eq. (5):

$$\beta_H = 1,5 [1 + (0,012HR)^{1,8}] h_o + 250 \leq 1500 \text{ dias} \quad (5)$$

onde:

- $h_o = 2A_c/u$ (mm), sendo A_c e u a área da seção transversal e o perímetro do elemento (no caso, das vigas de ensaio), respectivamente,
- HR é a humidade relativa do ambiente.

No caso do presente trabalho, onde foram utilizadas vigas com seção transversal retangular de 10cmx15cm ($h_o = 60$ mm), expostas a um ambiente com humidade relativa média de 50%, o coeficiente β_H é de 90 dias. Este parâmetro também é utilizado para fazer a regressão não linear do comportamento de deformação lenta por fluência das vigas seladas, levando em consideração as modificações que se introduzem no perímetro fictício e na humidade relativa. Para fazer a regressão dos parâmetros experimentais foi utilizado o programa computacional que utiliza o método dos mínimos quadrados para o cálculo dos coeficientes de regressão. Na Fig. 7 estão indicados os coeficientes de fluência a tempo infinito obtidos da extrapolação dos deslocamentos de longa duração medidos nas vigas de concreto de 15, 35, 45, 65 e 100 MPa.

Os coeficientes de correlação obtidos na regressão não linear dos valores experimentais estão próximos de 0.99, indicando que a recomendação de Bazant e Baweja (1994) é adequada, ou seja, é suficiente manter os ensaios de fluência por um período próximo de 3 meses. Observa-se na Fig. 7 que as deformações de longa duração são significativamente reduzidas à medida que os concretos possuem maior resistência à compressão.

Para os concretos de mais baixa resistência, a fluência de secagem (que é a fluência total menos a básica) representa uma parcela importante da fluência total, enquanto que a fluência básica (medida no elemento selado) representa uma parcela menor. Esta tendência se altera com o aumento da resistência à compressão do concreto, onde para os concretos de alta resistência, a fluência de secagem é similar a fluência básica. O concreto de baixa resistência possui maior relação água/cimento e, portanto, maior quantidade de água livre no interior do concreto para evaporar, provocando maior fluência de secagem.

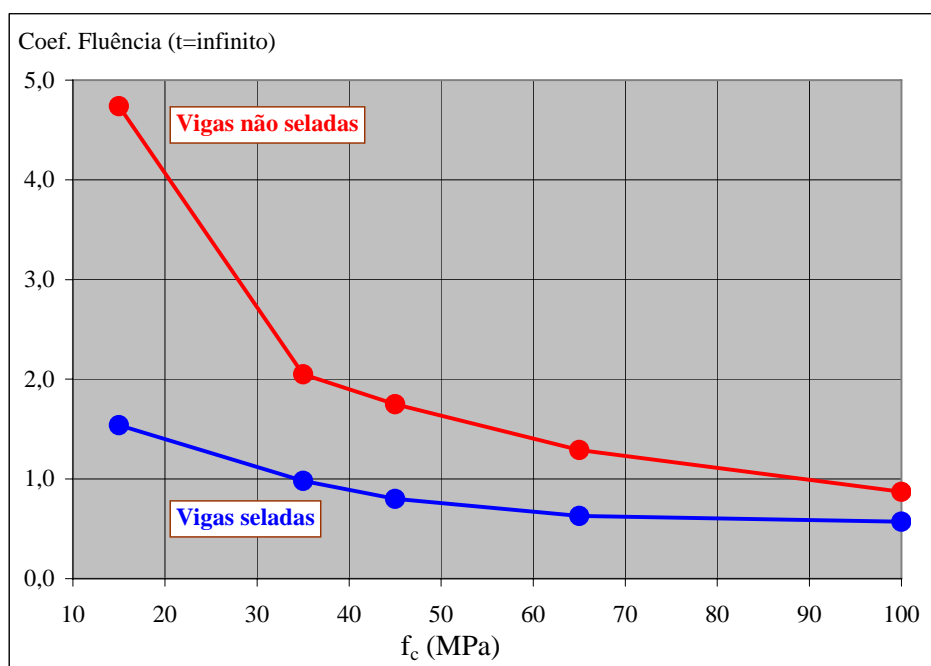


Figura 7. Variação do coeficiente de fluência das vigas com o tipo de concreto (tempo infinito de carga) e com o efeito da selagem externa da estrutura.

4. CONCLUSÕES

- Os coeficientes de fluência das vigas diminuem significativamente com o aumento da resistência à compressão dos concretos.
- Para o mesmo concreto, a simples selagem da superfície externa das vigas reduz significativamente as deformações de longa duração.
- Os ensaios de fluência podem ser realizados em um período reduzido de tempo, em torno de 3 meses, conforme sugerem Bazant e Baweja (1994).
- Os valores medidos sugerem que o modelo de previsão para o módulo de elasticidade seja função da raiz cúbica da resistência à compressão do concreto, conforme sugerem os modelos do CEB MC-90 e o EC-2, e não em função da raiz quadrada como sugerem tanto a NB-1/1978 como o projeto de revisão NB-1/2001.
- Para as vigas isostáticas utilizadas neste trabalho, os deslocamentos verticais instantâneos calculados segundo Branson (1977) ficaram muito próximos aos medidos experimentalmente, tanto no estado fissurado como não fissurado.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão das bolsas de iniciação científica aos alunos participantes na pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] CARBONARI, Gilberto - Comportamiento mecánico instantáneo y diferido del hormigón de alta resistencia. ETSECCPB – Universitat Politècnica de Catalunya, Departament D'Enginyeria de la Construcció, Barcelona, Espanha, 1996, 198 p. Tese de Doutorado.

Resultados experimentais de vários anos pesquisando as propriedades mecânicas instantâneas e diferidas dos concretos de baixo até alto desempenho, utilizando corpos-de-prova e vigas

- [2] PALEARI, A.; CARBONARI, G. - Propriedades mecânicas dos concretos de baixa, média e alta resistência. VIII Encontro Anual de Iniciação Científica. 27 a 30 de Junho, Ed. UNIOESTE, Cascavel, PR, 1999, p.321.
- [3] KONO, V.H.; CARBONARI, G. - Ensaio experimentais de fluência em vigas de concreto armado. IX Encontro Anual de Iniciação Científica. 02 a 07 de Julho, Ed. UEL, Londrina. PR, 2000, p. 399.
- [4] CARBONARI, G.[et al.] - Fluência em vigas de concreto de baixo, médio e alto desempenho, com e sem proteção de secagem. [CD-Rom]. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Universidade de Brasília-UnB, D.F., TBR343, 2002. 9 p.
- [5] CARBONARI, G.[et al.] - Sistema Simples e Prático de Carga em Ensaio Experimentais de Vigas. Revista Engenharia, Ciência e Tecnologia. v.6, nº 1, janeiro/fevereiro 2003. pp. 47-51.
- [6] TORALLES-CARBONARI, B.M. - Estudio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación y producción de hormigones de altas prestaciones.. ETSECCPB – Universitat Politècnica de Catalunya. Departament D'Enginyeria de la Construcció. Barcelona. Espanha. 1996, 179 p. Tese de Doutorado.
- [7] BAZANT, Z.P.; BAWEJA, S. - Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures - Model B3, Structural Engineering Report 94-10/603c (Northwestern University). Summarized by RILEM Committee TC107 (1995), Materials and Structures, 28, 1994, pp.357-365.
- [8] CEB-FIP Model Code 1990 - COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. London, Thomas Telford, 1993.
- [9] EC2 - Eurocódigo N°2 - Proyecto de Estructuras de Hormigón. 1ª Versión en Español, CEDEX, Madrid, diciembre 1991.
- [10] ABNT, NB-1 - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. 1978.
- [11] ABNT, NB-1 - Projeto de Estruturas de Concreto. 2003.
- [12] Branson, D.E. - Deformation of Concrete Structures, Ed. McGraw-Hill International, 1977.