



Avaliação teórico-experimental da deformação por fluência de concretos auto-adensáveis

A. L. N. Ferraz¹, M. P. Barbosa², F. M. Salles³, N. O. Pinto Jr.⁴

¹Universidade do Estado de Mato Grosso (Unemat), Brasil.

²Universidade Estadual Paulista (Unesp), Brasil.

³Laboratório Cesp de engenharia Civil (Cesp), Brasil.

⁴Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Brasil.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i3.19>

Artículo recibido el 21 de Julio de 2011, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 15 de Septiembre de 2011. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores se publicará en el segundo número del 2012 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primero de 2012.

© 2011 Alconpat Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 1, No. 3, Septiembre - Diciembre 2011, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com.
Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges.
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de Octubre de 2011.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMO

O comportamento de concretos auto-adensáveis de classes de resistências diferentes – 35 e 55 MPa – são avaliados em relação à deformação sob carregamento lento, fluência básica, nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias, e em relação as deformações devidas a retração por secagem. Ensaio de resistência à compressão, resistência à tração, e módulo de elasticidade foram executados para a caracterização mecânica complementar dos compósitos. Os ensaios de retração se mostraram adequados, apresentando curvas semelhantes com valores de deformação ligeiramente inferiores para os traços com água/cimento igual a 0,45 (concreto “B”). As deformações sob carga (fluência) foram maiores nos concretos com maior relação água/cimento, e menor módulo de elasticidade (concreto “A”). Os corpos-de-prova de idades mais avançadas apresentaram valores menores de fluência. As curvas de fluência apresentaram melhor estabilização nos corpos-de-prova de 28 e 56 dias. Os valores dos coeficientes calculados pela NBR 6118 (ABNT, 2003) apresentaram boa correlação com os coeficientes calculados experimentalmente.

Palavras-chave: fluência; retração; deformações em concretos; concreto auto-adensável.

ABSTRACT

The performance of self-compacting concretes of different classes – 35 e 55 MPa – were evaluated in relation to deformation under slow loading, basic creep, at ages of 7, 14, 28 and 56 days, and in relation to deformation due to shrinkage by drying. Test of compressive strength, tensile strength and elastic modulus were performed on the composites. The shrinkage results were appropriate, presenting similar curves with deformation values slightly lower for mixtures of water/cement equal to 0,45 (concrete “B”). The deformations under load (creep) were higher in the concretes with higher water/cement ratios and lower elastic moduli (concrete “A”). The more aged elements showed lower values of creep; the creep curves showed better stability in the elements with 28 and 56 days. The values of coefficients calculated as per NBR 6118 (ABNT, 2003) showed good correlation with the coefficients calculated experimentally.

Keywords: creep; shrinkage; deformations in concretes; self-compacting concrete.

Autor de contacto: M. P. Barbosa (mbarbosa@dec.feis.unesp.br)

1. INTRODUÇÃO

O emprego do Concreto Auto-Adensável (CAA), seja na indústria de pré-fabricados, seja em canteiros de obra, é uma realidade dos dias de hoje na Europa, Japão, Estados Unidos e, vem crescendo cada vez mais nos países da América do Sul. A necessidade de avaliar seu comportamento reológico e mecânico, sobretudo em relação à fissuração devido à retração e à fluência do material, motivou a realização deste estudo.

Uma das características do CAA, que lhe permite ser lançado facilmente sem necessidade de vibração ou outros meios de compactação, mantendo-se homogêneo, coeso e sem segregação (Su et al., 2001; Okamura, 1997), é a alta fluidez que este material oferece. Embora existam modificações nas proporções das misturas, faz-se necessário a utilização de aditivos superplastificantes na sua produção, assim como um aumento na proporção de materiais finos. De acordo com Su et al. (2001), uma dosagem adequada de superplastificante tende a aumentar a fluidez, a habilidade de autocompactar-se e a resistência à segregação do concreto no estado fresco.

Nos projetos de estruturas de concreto, o conhecimento das propriedades dos materiais é primordial para sua perfeita segurança, sendo que, o valor da fluência e da retração são parâmetros importantes em diversos casos. Embora seja possível encontrar na literatura internacional trabalhos sobre as deformações lentas e fissuração do concreto de auto-desempenho, no Brasil são poucos os dados disponíveis sobre esse assunto.

A qualidade geral do concreto e a influência do processo de hidratação, dependente do tempo, são funções importantes da deformação do concreto primariamente. Fatores adicionais tais como condições do ambiente, tamanho e forma do elemento, histórico de tensões, mistura do concreto, etc., também afetam o comportamento deformacional das estruturas de concreto.

No concreto as deformações podem ser viscoelásticas parcialmente reversíveis, consistindo de uma fase viscosa e de outra elástica e plástica não reversível (Neville, 1997). Além das deformações próprias causadas pela perda de água (retração) e pela variação de temperatura, existem também as deformações por cargas aplicadas. As deformações elásticas iniciais são seguidas das deformações viscoelásticas do concreto, denominada fluência. A fluência é o aumento da deformação ao longo do tempo, com tensão constante (deformação/carga). A fluência básica é a deformação sob carga quando o corpo-de-prova encontra-se selado, ou seja, quando este não perde umidade para o meio externo, sendo o processo de hidratação responsável pela redução da umidade no interior do elemento. Outra propriedade que não pode ser desprezada do concreto é a retração. A retração do concreto é a diminuição de volume devido à evaporação do excesso de água que não é consumida no processo de hidratação do cimento, sendo uma deformação que independe do carregamento. Ela é normalmente dividida em dois tipos, “a retração por secagem” e “retração autógena”.

A “retração por secagem” é a variação de volume observada no concreto quando este é submetido à variação de umidade, mantida a temperatura, sem nenhuma espécie de carregamento. A “Retração autógena” é definida como a mudança de volume sob temperatura constante, e sem perda de umidade da mistura cimentícia para o meio ambiente, causada pela redução da umidade relativa no interior dos poros em decorrência da evolução da hidratação do cimento.

Segundo Persson (2005), os coeficientes de fluência e retração do CAA são iguais aos do concreto convencional, o que pode ser justificado pelos fatores que afetam as deformações como idade, tipo e quantidade de agregado, ambiente, maturidade, umidade, porosidade, entre outros. Por outro lado, Seng e Shima (2005), avaliaram a fluência e retração em CAA com diferentes quantidades de fíler calcáreo, e concluíram que, a composição de concreto auto-adensável que utilizou maior quantidade de fíler calcáreo apresentou maior fluência; sendo os coeficientes de

fluência proporcionais à quantidade de fíler utilizado. Os autores também observaram que a fluência do CAA é maior que a do concreto convencional, mesmo no concreto convencional que contém o mesmo volume de fíler, diferindo de outros autores.

Existe, pois, uma certa divergência em relação aos coeficientes de fluência no CAA. Entretanto, no dimensionamento de estruturas de concreto, é fundamental conhecer seu comportamento quanto às deformações lentas. Nas normas internacionais (American Concrete Institute-ACI 318-05), e Brasileiras (NBR 6118, 2003) estão incluídos como parâmetros de cálculo, as deformações do concreto. Com relação à deformação lenta, conhecer o coeficiente de fluência é importante para que o projetista possa prever perdas de tensão em peças protendidas, prever as deformações no caso de descimbramento (Kalintzis, 2000). Portanto, conhecer o comportamento do concreto auto-adensável frente à fluência é um dos requisitos para que se possa, nas Normas Brasileiras de dimensionamento de estruturas de concreto armado e protendido, fornecer parâmetros condizentes com o comportamento desse material.

De acordo com o CEB-FIP (1990), o coeficiente de fluência de um concreto de elevado desempenho ($f_{ck} = 80$ MPa) é cerca de 25% menor do que o de um concreto de resistência normal. No Brasil não há registro de dados a esse respeito. A revisão da norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2003) praticamente mantém as recomendações já existentes anteriormente, e atende a concretos com f_{ck} até 50 MPa, apenas. Neste trabalho procurou-se, inicialmente, avaliar as deformações, a retração e a fluência básica, de concretos auto-adensáveis de diferentes classes de resistência, posteriormente objetivou-se calcular os coeficientes experimentais comparando estes valores com os coeficientes calculados pela NBR 6118.

2. MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Dois tipos de concreto foram avaliados: um concreto com teor de argamassa de 71% em volume, relação água/cimento de 0,45, relação água/finos de 0,36, apresentando resistência à compressão aos 28 dias de 55 MPa, e um concreto com teor de argamassa de 72% em volume, relação água/cimentos 0,64, relação água/finos igual a 0,41, e resistência à compressão de 35 MPa aos 28 dias.

2.1 Materiais

O cimento utilizado foi um cimento de alta resistência inicial, CPV – ARI Plus, cujas características físicas e químicas estão apresentadas na tabela 2. O fíler utilizado é de origem basáltica com massa específica de $2,86 \text{ g/cm}^3$, e 39,9% de material retido na peneira de 0,075 mm de diâmetro, cujo ensaio de granulometria a laser encontra-se apresentado na Figura 1. μ

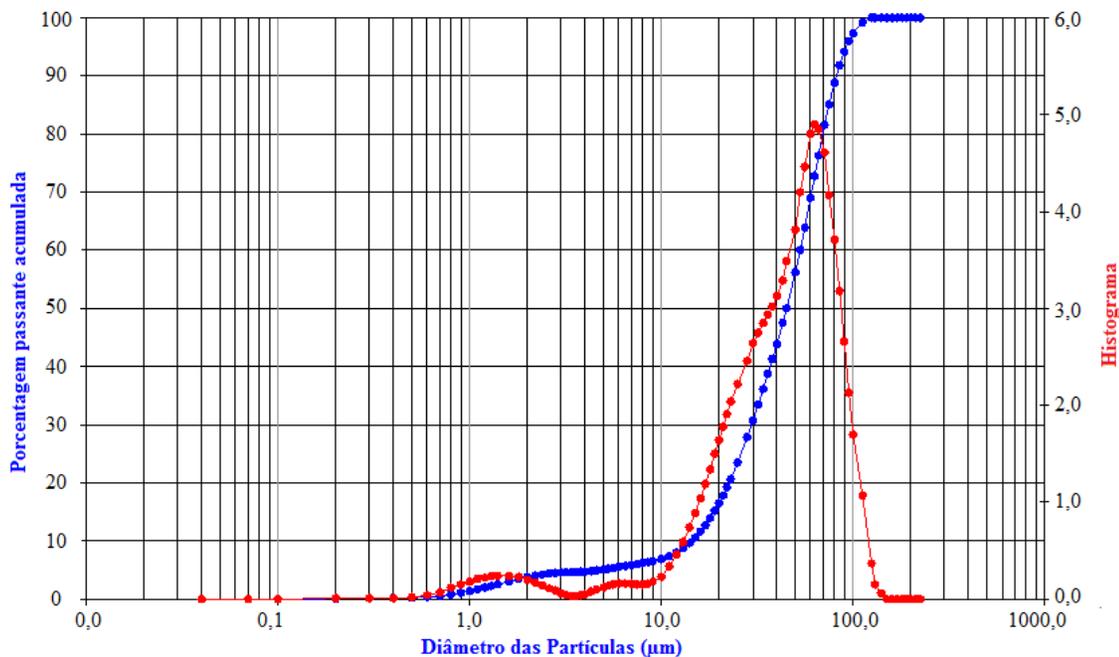


Figura 1. Curva granulométrica do filler

Os agregados utilizados, cujas curvas granulométricas são apresentadas nas figuras 2 e 3, foram a areia média do Rio São José dos Dourados, de origem granítica, e brita de origem basáltica cuja caracterização encontra-se na tabela 1.

O aditivo superplastificante utilizado tem como base uma cadeia de éter carboxílico modificado e foi desenvolvido para o concreto em geral, especialmente para indústria de pré-moldados e concretos protendidos, onde se requer maior durabilidade e desempenho, sendo também indicado para produção de C.A.A. Ele é isento de cloretos e atende às prescrições da norma ASTM C 494 (tipos A e F), ASTM C 107.

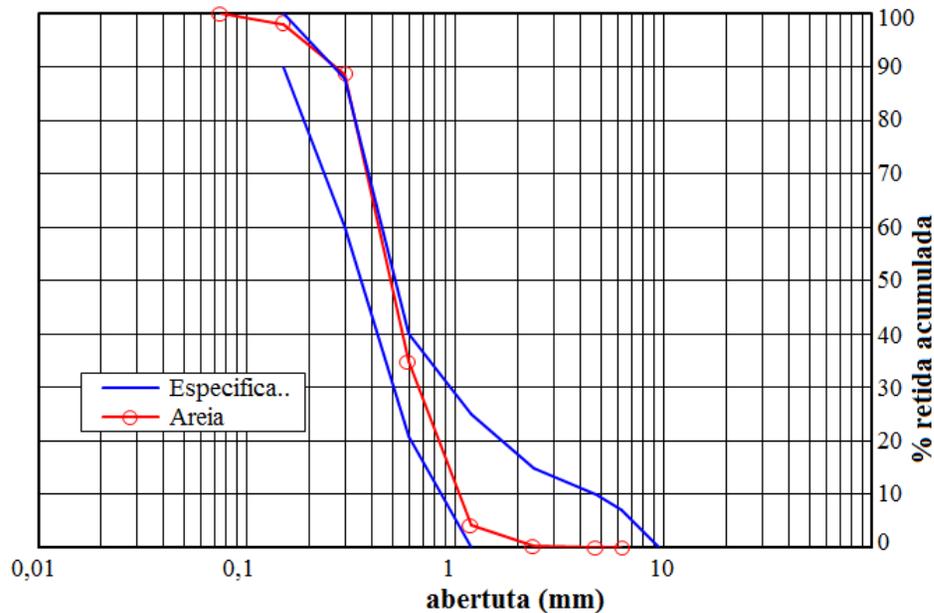


Figura 2. Curva granulométrica do agregado miúdo

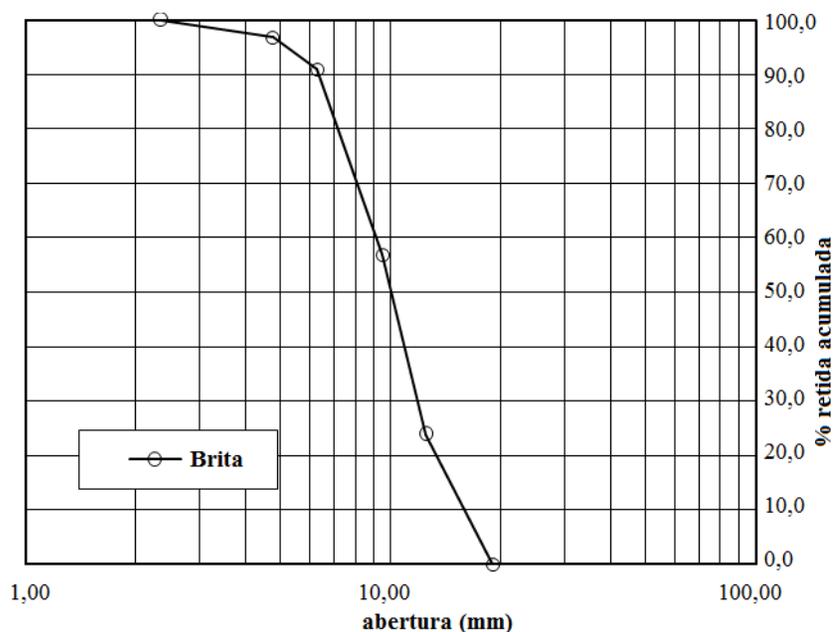


Figura 3. Curva granulométrica do agregado graúdo

Tabela 1. Caracterização dos agregados

		Brita 1	Areia
Granulometria (% retida acumulada)	Abertura das peneiras (mm)	38,1	0
		32,0	0
		25,4	0
		19,0	0
		12,7	23,8
		9,51	56,9
		6,30	91,0
		4,76	96,8
		2,38	100
		1,19	100
		0,595	100
		0,297	100
		0,149	100
0,075	100		
fundo	100		
Diâmetro máximo característico (mm)		19,0	2,38
Módulo de finura		6,54	2,59
Massa específica s.s.s (g/cm ³)		2,917	2,638
Massa específica seca (g/cm ³)		2,881	2,650
Massa específica aparente (g/cm ³)		2,987	2,631
Massa unitária solta (g/cm ³)		1,569	1,414
Absorção de água (%)		1,23	0,28
Material pulverulento (%)		0,54	0,15

Com relação às propriedades do concreto no estado fresco, a capacidade do aditivo de redução de água (40% aproximadamente) melhora as propriedades mecânicas do compósito, mantendo a trabalhabilidade, sem segregação e exsudação. A dosagem recomendada é de 0,5 a 1,0 litros, para cada 100 kg de material cimentício.

Tabela 2. Propriedades físicas e químicas do cimento utilizado

Propriedades Químicas		Propriedades físicas	
Perda ao fogo (%)	3,24	Finura peneira 200 (%retida)	0,32
Insolúveis (%)	0,26	Finura peneira 325 (%retida)	1,32
SiO ₂ (%)	19,10	Blaine (cm ²)	4072
Fe ₂ O ₃ (%)	3,00	Massa específica aparente (g/ cm ³)	0,94
Al ₂ O ₃ (%)	6,24	Massa específica absoluta (g/ cm ³)	3,12
CaO (%)	64,94	Início de pega (min)	132
MgO (%)	0,76	Finura peneira 200 (%retida)	0,32
SO ₃ (%)	2,74	Finura peneira 325 (%retida)	1,32
Na ₂ O (%)	0,11		
K ₂ O (%)	0,77		
Equiv. Alcalino Na ₂ O (%)	0,62		
Cal livre em CaO (%)	1,46		

2.2 Materiais e Programa Experimental

2.2.1 Concreto - Relação água/Cimento.

As relações água/cimento foram obtidas de acordo com as resistências à compressão pretendidas de 35 MPa e 55 MPa. Utilizou-se a expressão dada pela equação 1, em função da resistência à compressão aos 28 dias, referentes ao Cimento Portland Brasileiro de alta resistencia (Melo, 2005), equivalente ao Cimento Portland classe III (ASTM C150).

$$a/c = 1,03 \cdot \log \left(\frac{147,32}{f_{c28}} \right) \quad (1)$$

A dosagem do concreto resultou nos traços apresentados na Tabela 3, que emprega uma relação água/cimento de 0,64 para obter um concreto classe B 35/45 (resistência à compressão expressa em MPa), e uma relação a/c de 0,45 para o concreto de 55 MPa, agora denominados A e B, respectivamente.

Tabela 3. Composição e denominação dos traços de C.A.A.

Relação água/cimento	Volume de concreto (L)	Massa de cimento (Kg)	Massa de Filer (Kg)	Massa de Areia (Kg)	Massa de Brita (Kg)	Massa de Água (Kg)	Teor de aditivo (L)	Designação do concreto
0,45	1000	459,07	175,05	781,37	845,93	213,59	3,00	Concreto B
0,64	1000	347,20	211,82	827,36	816,76	229,16	2,10	Concreto A

2.2.2 Produção do Concreto.

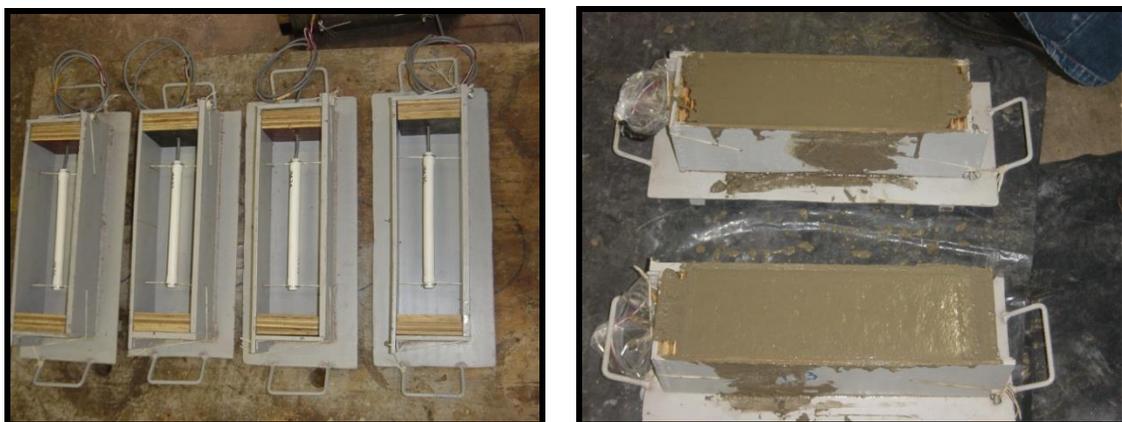
A produção do concreto obedeceu as seguintes etapas: determinação do teor de agregado graúdo; ajuste da porcentagem de aditivo; e avaliação do concreto de acordo com as propriedades requeridas. Numa primeira fase foram produzidos 20 litros de concreto para o ajuste do teor de brita e de aditivo, e em seguida, foram produzidos 80 litros de concreto para a elaboração dos corpos de prova para os ensaios de fluência, retração, resistência à compressão, resistência à tração, e Módulo de elasticidade.

O tempo de mistura para preparo dos compósitos foi realizado em 16 minutos: Agregado graúdo e 80% da água (1 minuto); Cimento, fíler e 15% da água, (1 minuto e 30 segundos); Areia e pó de pedra (1 minuto e 30 segundos); Remoção do material aderido às pás e paredes da betoneira, que permanecia desligada (3 minutos); Betoneira acionada (2 minutos); incorporação da primeira parcela do aditivo e restante da água, (3 minutos); Segunda parcela do aditivo (4 minutos).

2.2.3 Ensaios de Retração por Secagem

Os ensaios de retração por secagem foram realizados de acordo com a norma MERCOSUL NM 131:97, a qual define a retração hidráulica como sendo “a redução de volume observada quando o concreto é submetido a uma perda de umidade e mantido à temperatura constante, sem nenhuma espécie de carregamento”.

Para cada uma das composições de concreto foram moldados dois corpos-de-prova prismáticos de 150x150x600 mm, os quais foram desmoldados e colocados em recipientes com água saturada de cal, à temperatura de $23,0 \pm 2,0$ °C, por 30 minutos, antes de se proceder à leitura do comprimento inicial. Realizada esta leitura, os mesmos, foram novamente estocados em recipientes com água, até a idade de 28 dias. Ao fim do período de cura (28 dias), foi tomada a segunda leitura de comprimento. A seguir, os corpos de prova foram transferidos e estocados em sala climatizada ($23,0 \pm 2,0$ °) e com umidade relativa igual a $50 \pm 4\%$. As medidas das deformações foram realizadas com o auxílio de extensômetros tipo Carlson, embutidos no concreto. Foram realizadas leituras diárias até a estabilização das deformações, sendo primordial, o uso cuidadoso dos instrumentos medidores e calibradores, sob as mesmas condições de temperatura. As figuras de 4 e 5 ilustram as etapas da moldagem dos corpos-de-prova para ensaio de retração.



Figuras 4 e 5. Detalhes de extensometria e da concretagem dos corpos de prova para ensaio de retração.

2.2.4 Ensaio para Determinação da Fluência

Nos ensaios de fluência básica, realizados de acordo com a norma NBR 8224 /83 - Determinação da Fluência (ABNT, 1983), os corpos de prova foram selados conforme ilustram as figuras 6 e 7. Das prescrições desta norma pode-se destacar a necessidade de realização de ensaios complementares de resistência à compressão e de módulo de elasticidade. Os corpos-de-prova cilíndricos, com relação altura/diâmetro > 2 são instrumentados com extensômetros embutidos nos mesmos, para medida das deformações. A tensão de carregamento é igual a $40 \pm 2\%$ da resistência à compressão do concreto na idade de carregamento. Para a determinação da deformação por retração autógena, utilizam-se dois corpos de prova, munidos de dispositivos de medição da deformação que permanecem descarregados durante todo período de ensaio. A deformação por fluência básica em qualquer idade foi calculada segundo a equação 2:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_t - \varepsilon_i - \varepsilon_s \quad (2)$$

Onde:

ε_{cc} – deformação por fluência básica; ε_t – deformação total a partir da leitura de referência nos corpos-de-prova sob carregamento, na idade considerada; ε_i – deformação imediata medida no ato da aplicação da carga; ε_s – deformação média dos corpos-de-prova complementares não submetidos a carregamento (retração autógena).

Para medida das deformações e da temperatura no interior dos corpos-de-prova de concreto foram utilizados extensômetros tipo Carlson, modelo M4. Os moldes cilíndricos foram envolvidos por borracha cuidadosamente colocada para isolamento total do corpo-de-prova. Com auxílio de barbantes, os extensômetros foram posicionados no interior do corpo-de-prova. Os fios dos extensômetros saem do corpo-de-prova pelo orifício inferior e são devidamente isolados do contato com água ou concreto. Durante a concretagem, o concreto é lançado com cuidado para não alterar o posicionamento dos extensômetros. Na Figura 6 pode-se observar o esquema de colocação dos extensômetros no corpo-de-prova, e na Figura 7 os detalhes da concretagem e nivelamento destes enquanto que a Figura 8 ilustra a sala de ensaios de fluência do Laboratório Cesp de Engenharia civil (LCEC).

Os corpos-de-prova são submetidos ao carregamento em sala climatizada, o carregamento é executado por meio de macacos hidráulicos, as leituras de deformação (medida fornecida em valores de resistência elétrica Ω (ohms), para posterior conversão em medidas de deformação (ε_t)) foram realizadas periodicamente para determinação da curva de deformação sob carga x idade. A aparelhagem de execução deste ensaio encontra-se melhor detalhada na NBR 8224.



Figuras 6 e 7. Detalhes da Extensometria e da concretagem e nivelamento dos corpos de prova selados dos ensaios de fluência.



Figura 8. Sala de Fluência do Laboratório CESP de Engenharia Civil(LCEC).

2.2.5 Métodos para Previsão da Fluência e da Retração por Secagem

Os métodos para previsão da fluência e da retração, encontrados nas normas nacionais e internacionais de concreto, dão suporte para a rápida estimativa destes valores quando não existem tempo e laboratórios para a realização de ensaios experimentais.

Os coeficientes de fluência foram calculados de acordo com a metodologia proposta pela NBR 6118/2003. Estes coeficientes calculados pela norma foram comparados com os coeficientes de fluência básica experimentais, que são encontrados inserindo os valores dos ensaios na equação 3 abaixo:

$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon_{\text{total}}(t) - \varepsilon_i - \varepsilon_s(t)}{\varepsilon_i} \quad (3)$$

onde:

$\varepsilon_{\text{total}}(t)$ = deformação total medida nos corpos de prova carregados

$\varepsilon_i(t)$ = deformação inicial medida no momento do carregamento dos corpos de prova ($t=t_0$)

$\varepsilon_s(t)$ = deformação por retração autógena medida em corpos de prova mantidos selados e descarregados

3. RESULTADOS

3.1 Ensaios das Propriedades Mecânicas dos Concretos

A tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas, referentes aos dois tipos de concreto, A e B, os quais foram realizados nas idades de 3, 7, 14, 28, 90, e 180 dias.

Tabla 4. Resultados das propriedades mecânicas dos concretos A e B

Ensaio	Resistência à compressão (MPa)		Resistência à tração (MPa)		Modulo de Elasticidade (GPa)	
	Concreto A	Concreto B	Concreto A	Concreto B	Concreto A	Concreto B
Traço						
Idade						
3 dias	23	38,1	2,4	4	*	*
7 dias	27	43,8	2,6	4,3	*	*
14 dias	30,5	48,8	3	5,2	23,8	33,3
28 dias	33,3	52,1	3,3	5,4	29,4	35,8
90 dias	35,2	58,3	3,5	5,7	*	*
180 dias	37,4	59,2	3,6	5,7	30,2	38,5

*Observação: ensaios não realizados nesta idade

Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias ficaram próximos a 35 MPa e a 55 MPa para os concretos tipo A e B, respectivamente. Os resultados de resistência à tração apresentaram valores compatíveis, em torno de 10% dos valores encontrados para resistência à compressão. Os valores de módulo de elasticidade apresentaram pouca variação dos 28 dias até os 180 dias, o que também ocorreu com os resultados de resistência, o que demonstra certa estabilização mecânica depois dos 28 dias.

3.2 Ensaio de Retração por secagem

A figura 9 apresenta os resultados de retração (através do gráfico de deformação x idade) realizados para os concretos A e B, respectivamente. Foram monitorados, para cada tipo de concreto, dois corpos-de-prova, sendo as respectivas curvas a média dos valores dos dois corpos de prova de cada tipo de concreto.

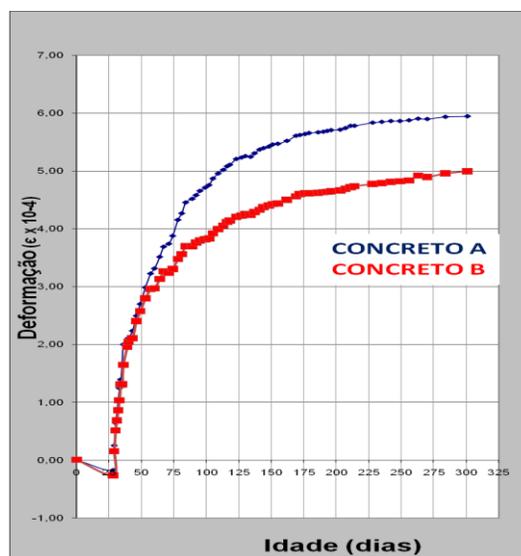


Figura 9. Comparação da Retração entre os A e B.

A variação negativa da deformação por retração, observada no início dos ensaios (período de 0 a 28 dias) deve-se à imersão dos corpos-de-prova em água, segundo especifica a norma MERCOSUL NM 131:97. O concreto que apresentou menor resistência à compressão e menor módulo de elasticidade (Concreto A) foi aquele que apresentou resultados levemente superiores.

Mehta e Monteiro (1994) relatam que concretos com maiores teores de argamassa geralmente apresentam maiores taxas de deformação, o concreto B possui 70% de argamassa, enquanto o concreto A possui 72% de argamassa, provavelmente a diferença no teor de argamassa proporcionou uma maior deformação por retração no concreto A.

Os concretos auto-adensáveis apresentaram retração ligeiramente superior, aos resultados de concretos convencionais, com resistência mecânica similar, encontrados na literatura (Silva, 2007), ressaltando a influência dos materiais utilizados nos diferentes estudos; O elevado teor de argamassa do C.A.A. (maior ou igual a 70%) resulta em maiores valores de deformação por retração.

3.3 Ensaio de fluência

As figuras 10(a) e 10(b) apresentam os resultados dos corpos-de-prova que não foram submetidos a carregamento.

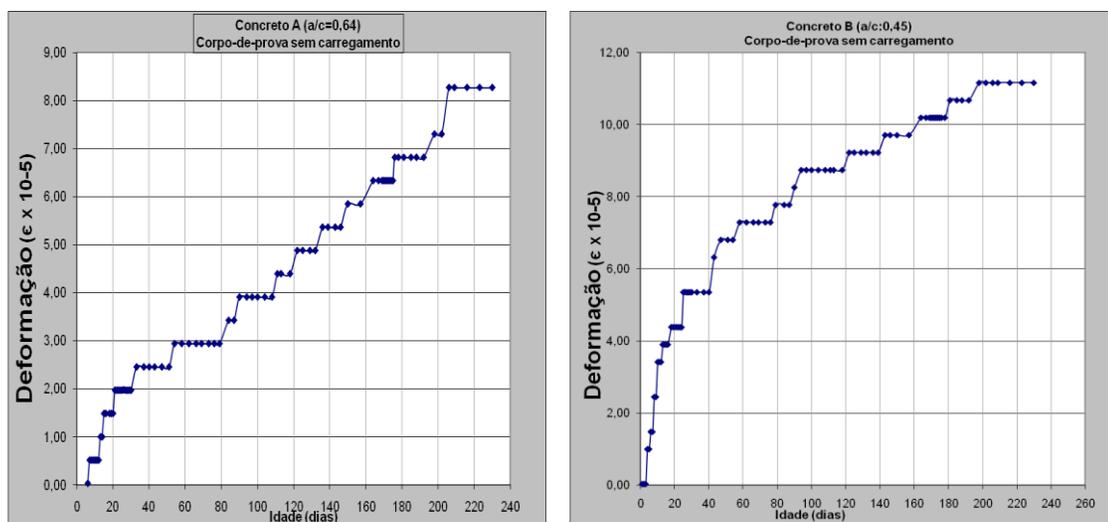
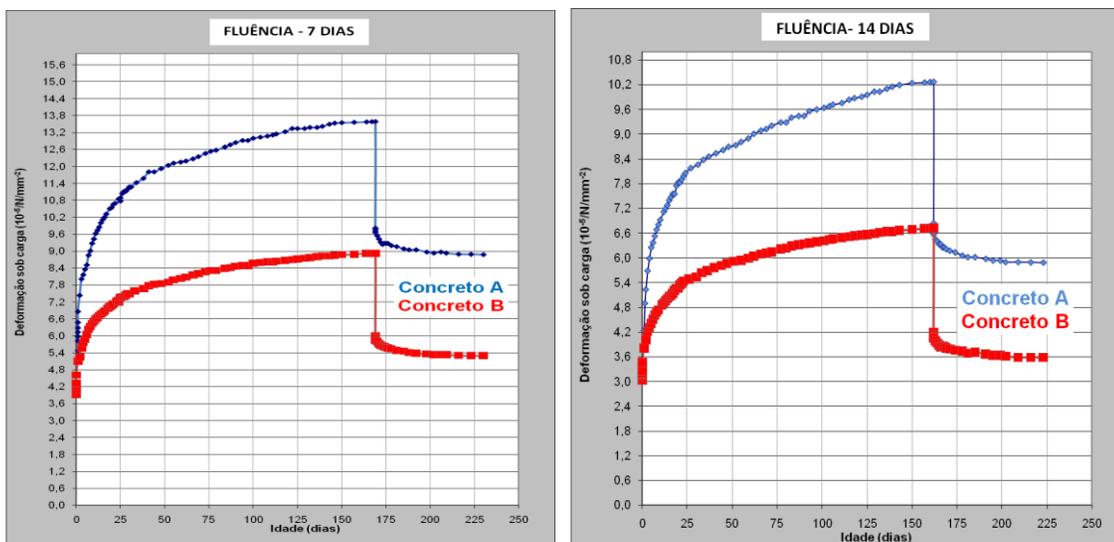


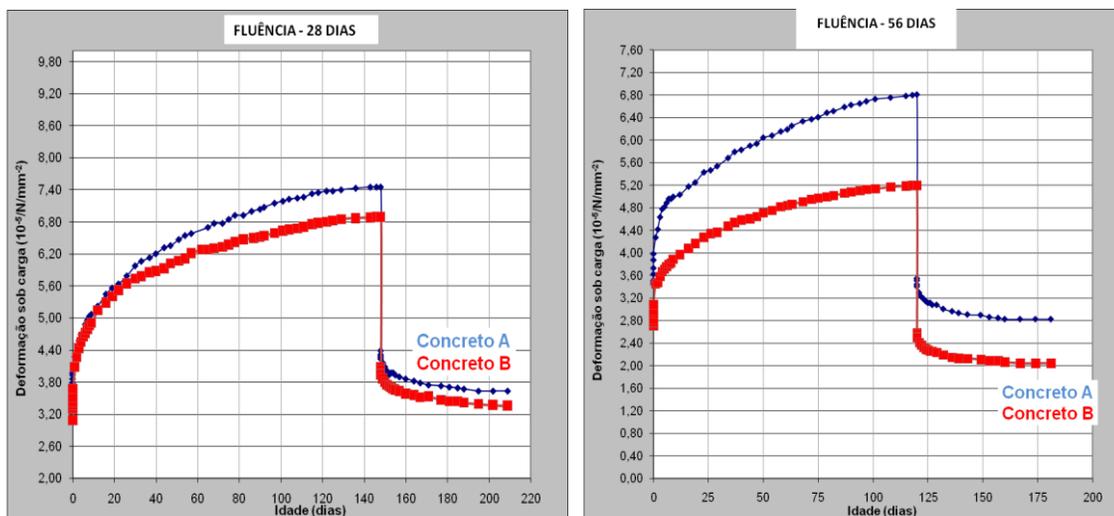
Figura 10. Deformação do corpo de prova não carregado (deformação por retração autógena) (a) Concreto A; (b) Concreto B

A figura 10 mostra que, quando se analisam elementos isolados (sem perda de água para o meio ambiente) e sem carregamento (onde os parâmetros mecânicos dos compósitos perdem importância), os traços com maior quantidade de cimento (Concreto B) demandam maior quantidade de água, ocasionada, provavelmente, pela maior velocidade de formação dos compostos hidratados de cimento (silicato de cálcio hidratado e aluminatos de cálcio hidratado), ocasionando assim maiores deformações (Concreto B), deformação final igual a aproximadamente 11×10^{-5} , e deformação final igual a aproximadamente 8×10^{-5} (concreto A). Nas figuras a seguir (11 a 14) são apresentados o comportamento com relação à fluência sob carregamento ao longo do tempo. Cada gráfico corresponde a média de dois corpos-de-prova. Foram ensaiados no total dezesseis corpos-de-prova, o que totalizou oito corpos de prova por composição por idade do concreto (7, 14, 28, e 56 dias).



Figuras 11 e 12– Comparação da fluência básica dos concretos A e B carregados aos 7 dias, e 14 dias, respectivamente.

As figuras 11 e 12 retratam que o carregamento poderia ter permanecido por mais tempo para melhor estabilização da fluência básica, principalmente aos 14 dias. Por outro lado, as estabilizações das deformações sob carga máximas do concreto B, e as estabilizações das deformações residuais de ambos os concretos mostraram-se adequadas, com a repetição das 3 últimas leituras. Os corpos-de-prova de maior resistência, e de maior módulo de elasticidade (Concreto B) apresentaram deformações sob carga máximas em torno de $8,8 \times 10^{-5}/N/mm^2$, no ensaio iniciado aos sete dias, e $6,8 \times 10^{-5}/N/mm^2$ no ensaio de 14 dias, menores que os valores do concreto A ($13,6 \times 10^{-5}/N/mm^2$, no ensaio iniciado aos sete dias, e $10,4 \times 10^{-5}/N/mm^2$ no ensaio de 14 dias).



Figuras 13 e 14. Comparação da fluência básica dos concretos A e B carregados aos 28, e 56 dias, respectivamente.

A figura 13 mostra que os ensaios de fluência iniciados aos 28 dias apresentaram estabilizações adequadas (repetição das 3 últimas leituras) tanto nas máximas deformações sob carga, quanto nas deformações residuais. Observa-se que os corpos-de-prova de menor relação água/cimento (Concreto B), apresentaram valores menores para as deformações sob cargas máximas, em torno

de $6,8 \times 10^{-5}/N/mm^2$, que o concreto A, cujos valores de deformação sob carga são da ordem de $7,5 \times 10^{-5}/N/mm^2$. Esta diferença entretanto, foi menor quando comparada com a apresentada nas idades de 7 e 14 dias.

A figura 14 apresenta os resultados experimentais dos ensaios de fluência básica iniciados aos 56 dias. Pode-se observar que houve uma estabilização adequada tanto nas máximas deformações sob carga, quanto nas deformações residuais, com o concreto A necessitando de mais tempo para se estabilizar, tempo este superior a 100 dias de ensaio. Os corpos-de-prova do concreto B novamente apresentaram valores de deformação máxima sob carga inferiores aos do concreto A, ou seja de $5,2 \times 10^{-5}/N/mm^2$ contra $6,8 \times 10^{-5}/N/mm^2$. Observou-se também que o tempo de início do carregamento leva a valores menores de deformações sob carga finais e residuais, devido ao incremento das propriedades mecânicas com o tempo.

3.3.1. Parâmetros de fluência

A Tabela 5 apresenta os parâmetros de fluência obtidos nos ensaios experimentais realizados aos 7, 14, 28, e 56 dias nos concretos A e B.

Tabela 5. Parâmetros de fluência

Traço (a/c)	Idade (dias)	(ϵ_i)	(ϵ_t)	(ϵ_s)	(ϵ_{cc})
Concreto A	7 dias	0,0007	0,0017	0,00008	0,00092
Concreto B	7 dias	0,00075	0,0016	0,00011	0,00074
Concreto A	14 dias	0,00057	0,00127	0,00008	0,00062
Concreto B	14 dias	0,00063	0,00132	0,00011	0,00058
Concreto A	28 dias	0,00048	0,000932	0,0008	0,000372
Concreto B	28 dias	0,00069	0,001358	0,00011	0,000558
Concreto A	56 dias	0,00048	0,000917	0,00008	0,000357
Concreto B	56 dias	0,00061	0,00114	0,00011	0,00042

3.4 Comparação entre os coeficientes experimentais e os coeficientes fornecidos pelas normas

De acordo com a NBR 6118 o cálculo dos coeficientes de fluência depende de vários fatores, tais como umidade, temperatura, área do elemento estrutural, espessura, idade, entre outros. Com base nas diversas informações da estrutura foram calculados alguns coeficientes preliminares (ϕ_a , ϕ_f , ϕ_d , ϕ_{1c} , ϕ_{2c}) para que se possa estimar o coeficiente de fluência (ψ). Estes coeficientes dependem de alguns fatores conforme apresentado a seguir:

- Φ_a ou coeficiente de fluência rápida: varia de acordo com o tipo de cimento, idade fictícia, e temperatura média;
- ϕ_f ou coeficiente de fluência irreversível: depende da umidade relativa, espessura fictícia, e consistência do concreto. Observa-se aqui que a norma NBR 6118[7] especifica valores máximos de abatimento de 15 cm, o que não atende o abatimento dos concretos fluidos; ϕ_d ou coeficiente de fluência reversível: depende apenas do tempo de carregamento; ϕ_{1c}^1 ou

^{1,2} * ϕ_{1c} e ϕ_{2c} entram no cálculo da determinações de ϕ_f

coeficiente que depende da umidade relativa e da consistência do concreto; ϕ_{2c^2} ou coeficiente que depende da espessura fictícia da peça.

O coeficiente de fluência (ϕ) é encontrado pela soma de ϕ_a , ϕ_f , ϕ_d , e a deformação por fluência, válida para $t_0 = 28$ dias, dada pela equação 4, ou seja

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{cca} + \varepsilon_{ccd} + \varepsilon_{ccf} = \frac{\sigma_c}{E_{c28}} \phi(t, t_0) \quad (4)$$

A Tabela 6 apresenta os valores dos coeficientes (ϕ_a , ϕ_f , ϕ_d , ϕ_{1c} , ϕ_{2c} , e ϕ) calculados de acordo com a NBR 6118 para os concretos A e B, enquanto que na Tabela 7 estão listados os valores dos coeficientes de fluência calculados experimentalmente, usando-se a equação 3 com os resultados dos concretos A e B apresentados na Tabela 5. As figuras 15 e 16 apresentam os gráficos comparando os dois concretos.

Tabela 6. Coeficiente de fluência calculados de acordo com NBR 6118

Traço (a/c)	Idade (dias)	ϕ_a	ϕ_f	ϕ_d	ϕ_{1c}	ϕ_{2c}	Coeficiente de fluência (ϕ)
Concreto A	7	0,2806	0,8957	0,3681	1,6	1,217817	1,5444
Concreto B	7	0,2806	0,8957	0,3681	1,6	1,217817	1,5444
Concreto A	14	0,1995	0,6820	0,36692	1,6	1,217817	1,24842
Concreto B	14	0,1995	0,6820	0,36692	1,6	1,217817	1,24842
Concreto A	28	0,1312	0,468658	0,364183	1,6	1,217817	0,964041
Concreto B	28	0,1312	0,468658	0,364183	1,6	1,217817	0,964041

Tabla 7. Valores dos Coeficientes de fluência calculados por meio dos resultados experimentalmente

Traço (a/c)	Idade (dias)	ε_i	ε_t	ε_s	ε_{cc}	Coeficiente de fluência (ψ)
Concreto A	7 dias	0,0007	0,0017	0,00008	0,00092	1,3143
Concreto B	7 dias	0,00075	0,0016	0,00011	0,00074	0,9867
Concreto A	14 dias	0,00057	0,00127	0,00008	0,00062	1,0877
Concreto B	14 dias	0,00063	0,00132	0,00011	0,00058	0,9206
Concreto A	28 dias	0,00048	0,000932	0,0008	0,000372	0,7750
Concreto B	28 dias	0,00069	0,001358	0,00011	0,000558	0,8087
Concreto A	56 dias	0,00048	0,000917	0,00008	0,000357	0,7438
Concreto B	56 dias	0,00061	0,00114	0,00011	0,000420	0,6885

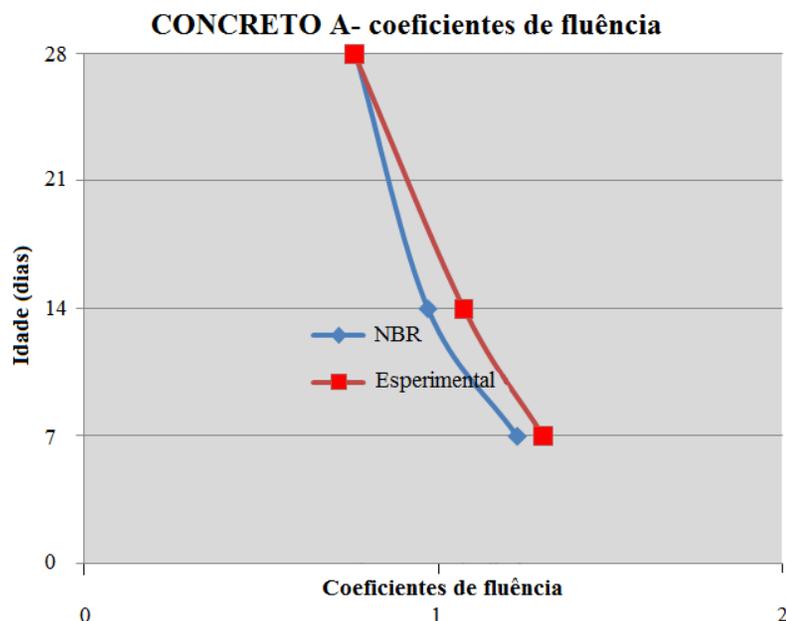


Figura 15. Variação dos coeficientes de fluência (concreto A).

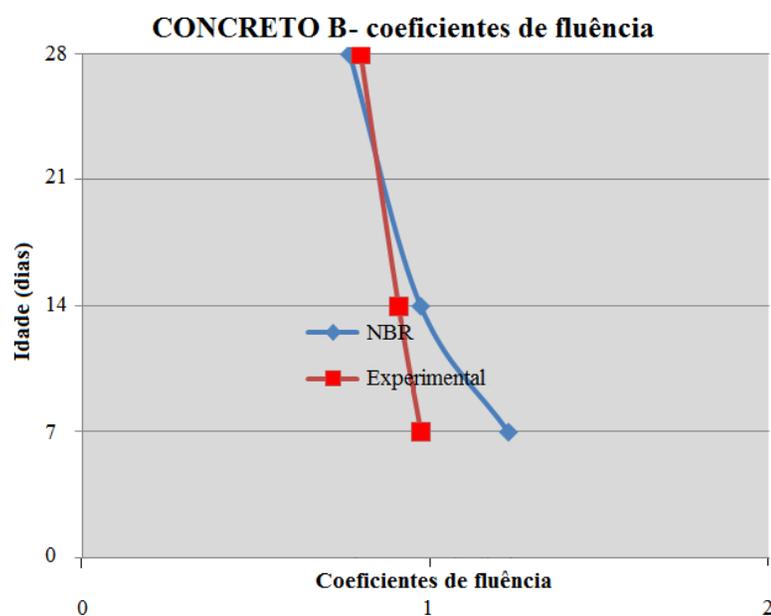


Figura 16. Variação dos coeficientes de fluência (concreto B).

4. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Os ensaios de retração se mostraram adequados, apresentando curvas semelhantes com valores de deformação ligeiramente superiores para o concreto A. A literatura afirma que Concretos com maiores teores de argamassa apresentam maiores taxas de deformação. Neste estudo, o concreto tipo A possui 72% de argamassa, enquanto o concreto tipo B possui 70% de argamassa. Provavelmente a diferença no teor de argamassa tenha proporcionado uma maior deformação por retração no concreto tipo A .

Nos ensaios de fluência, os tempos dos ensaios, carregamento, descarregamento, e estabilização das deformações residuais, foram adequados, com as curvas apresentando assíntotas bem

definidas. Os corpos-de-prova com idades mais avançadas (28 dias, e 56 dias) apresentaram curvas com melhores padrões de estabilização, repetição das 3 últimas leituras.

Os resultados dos corpos-de-prova sem carregamento, apresentaram deformações autógenas máximas, aproximadamente 10 vezes menores que os valores das leituras de deformação por retração, e mostram que o traço de concreto com maior quantidade de cimento (concreto A) demanda maior quantidade de água, ocasionada, provavelmente, pela maior velocidade de formação dos compostos hidratados de cimento (silicato de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados), ocasionando assim maiores deformações. Observa-se que o concreto B apresentou deformação final de aproximadamente 11×10^{-5} enquanto que o concreto A apresentou deformação final de aproximadamente 8×10^{-5} .

Os valores das máximas deformações sob carga foram maiores para os traços de menor módulo de elasticidade, como esperado. Com o aumento do tempo inicial de carregamento dos ensaios os patamares máximos de deformações diminuem, devido à evolução com o tempo das propriedades mecânicas do concreto.

Verifica-se que houve uma boa aproximação entre os coeficientes experimentais e os calculados por Norma; Embora a NBR 6118 leve em consideração valores máximos de abatimento de 15 cm (portanto não houve diferença nos coeficientes de fluência na mesma idade quando alteramos a relação água/cimento, já que ambos os traços utilizam superplastificante e são fluidos portanto foram enquadrados no valor máximo de abatimento (15 cm).

Os coeficientes calculados pela NBR 6118 foram maiores em todas as idades, tanto para o concreto A, como para o concreto B, devido, provavelmente, pelos coeficientes experimentais serem calculados para fluência básica, enquanto os calculados pela NBR 6118 consideram a fluência total.

No cálculo da deformação por fluência o coeficiente é multiplicado pela tensão dividida pelo módulo de elasticidade, alterando desta maneira os valores de deformação para concretos de diferentes resistências, e diferentes relações água/cimento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório CESP de Engenharia Civil –LCEC e a FAPESP pelo financiamento do projeto.

6. REFERÊNCIAS

Almeida L. C. (2006), Emprego de Técnicas de Análise Inversa para Identificação de Parâmetros a partir de Dados de Monitoração em Elementos Estruturais, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista-Unicamp, 191p. Cam

American Concrete Institute (2005), *Building Code Requirements for Structural Concrete & Commentary*. ACI 318-05. Can be ordered at: <http://www.aci-int.org/PUBS/newpubs/318-05.htm>

American Society for Testing and Materials (1992), *Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete*, ASTM C 1017. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.

American Society for Testing and Materials (1992), *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM C 494 / C494M. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia

American Society for Testing and Materials (2007), International made three technical changes to ASTM C 150 - Specification for Portland Cement.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1983), *Concreto endurecido – determinação da fluência*, NBR 8224 /83. Rio de Janeiro, 1983.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003), *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*, NBR 6118/2003. Rio de Janeiro, 2003.
- Comite Euro-International du Beton (1990), *CEB-FIP Model code 1990*. Lausanne, 1991. (Bulletin d'Information, 203).
- Kalintzis C. A. A. (2000), *Estudo da Fluência do concreto de elevado desempenho*, Dissertação de mestrado Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 123 pp.
- Melo K.A. (2005), *Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário*, 180p, Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis, SC.
- Mercosul NM 131:97 (1998), *Concreto endurecido – Determinação da retração hidráulica ou higrométrica do concreto*, Comité Mercosul de Normalización. 1998.
- Neville A. M. (1997), *Propriedades do Concreto*, Editora Pini, São Paulo, 828 pagina, 2º edição.
- Okamura H. (1997), *Self-compacting high performance concrete*, Concrete International. pp. 50-54. v. 19. No. 7.
- Persson B. (2005), *Self Consolidating Concrete, High Performance and Normal Concrete affected by creep at different age, curing, loading level, strength and water-cement ratio with some interrelated properties*, In: IV International ACI/CANMET Conference on Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Material, Olinda. Anais: CD-ROOM.
- Seng V., Shima H. (2005), *Creep and Shrinkage of self-compacting concrete with different limestone powder contents*, SCC-2005, Oct.30-Nov.2, Chicago-USA, 2005.
- Silva E.F. (2007), *Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração*, Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. 332p. Rio de Janeiro, 2007.
- Su N. et al. (2001), *A Simple Mix Design Method for Self-Compacting Concrete*. Cement and Concrete Research No. 31, pp.1799-1807.