

Avaliação do desempenho das propriedades mecânicas de concretos self-compacting elaborados com diferentes tipos de cimentos submetidos à cura térmica

Avaliação do desempenho das propriedades mecânicas de concretos auto-adensáveis elaborados com diferentes tipos de cimentos submetidos à cura térmica



L.F.SANTOS^a
liaengenhariacivil@hotmail.com

M.P.BARBOSA^b
mbarbosa@dec.feis.unesp.br

Abstract

Steam curing is one of the mechanisms used in the precast industry to accelerate the strength gain of structural elements. The values of temperature and time of ideal cures for this strength gain vary with the cement and mix design used in concrete. Little is known about the behavior of self-compacting concrete (SCC) when subjected to the steam accelerated curing process, especially with regards to its mechanical properties. This article evaluates the compressive strength of two mixture designs of self-compacting concrete class 40 MPa with two different cements, cement CP III 40-RS and CP II E-32 submitted to normal curing (I accordance with NBR 5738:2003 [2]) and to steam curing. Two different steam curing temperatures were used, at 65°C and 80°C and three curing cycles, 4 h, 6 h and 8 h. The study was done at the Laboratory of Civil Engineering CESP - LCEC – Ilha Solteira/SP, where concretes with specimen cylinders of 10 cm x 20 cm were tested. The compressive strengths were obtained at the end of the steam curing plateau (called immediate strength to the cycle) and at ages 3, 7, 28, 56 and 91 days (called strength at advanced ages) and for concrete subjected to normal curing, the ages of rupture were performed at 3, 7, 28, 56 and 91 days. An analysis of the correlation was performed between the values of rupture of the concrete subjected to normal cure, with the values of immediate strength to the cycle and also to the strength at advanced ages. The benchmarks were performed according to the type of cement used, curing temperature and time in the steam curing plateau. Overall, the results show that the concrete with cement CP II E-32 at 65 °C, for the steam curing plateau of 4 hours, was the best compressive strength value when subjected to these curing conditions, while the concrete with cement CP III 40-RS at 65 °C, for 6 hours of steam curing plateau, was the optimum strength value.

Keywords: self-compacting concrete, compressive strength, steam curing, curing temperature, isothermal plateau.

Resumo

A cura térmica a vapor é um dos mecanismos utilizados na indústria de pré-moldados para acelerar o ganho da resistência dos elementos estruturais. Os valores de temperatura e tempos de cura ideais para ocorrer esse ganho de resistência variam conforme o cimento e o traço utilizado no concreto. Pouco se conhece sobre o comportamento do concreto auto-adensável (CAA) quando submetido ao processo de cura acelerada a vapor, principalmente em relação às suas propriedades mecânicas. O presente artigo avalia a resistência à compressão de duas composições de concreto auto-adensáveis de classe 40 MPa elaborados com cimentos distintos, cimento CP III 40-RS e cimento CP II E-32 submetidos à cura normal (de acordo com a NBR 5738:2003 [2]) e à cura térmica a vapor. Foram utilizadas duas temperaturas de cura térmica distintas, 65°C e 80°C e, três patamares isotérmicos, 4 h, 6 h e 8 h. O estudo foi feito no Laboratório CESP de Engenharia Civil – LCEC – Ilha Solteira/SP, onde foram ensaiados corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm. As resistências à compressão foram obtidas ao fim do patamar de cura térmica a vapor (denominada resistência imediata ao ciclo) e nas idades de 3, 7, 28, 56 e 91 dias (denominadas resistências nas idades avançadas) e, para os concretos submetidos à cura normal, as idades de ruptura foram realizadas com 3, 7, 28, 56 e 91 dias. Foram feitas análises de correlação entre os valores de ruptura dos concretos submetidos à cura normal com os valores de resistência imediata ao ciclo e também para as resistências nas idades avançadas. As análises comparativas foram realizadas em função do tipo de cimento empregado, temperatura de cura e tempo no patamar isotérmico. Os resultados encontrados mostram que em termos globais, o concreto com cimento CP II E-32 apresentou a 65°C, para o patamar isotérmico de 4 horas o melhor valor de resistência à compressão quando submetido a estas condições de cura, enquanto que o concreto com cimento CP III 40-RS apresentou a 65°C, para o patamar isotérmico de 6 horas o melhor valor de resistência.

Palavras-chave: concreto auto-adensável, resistência à compressão, cura térmica à vapor, temperatura de cura, patamar isotérmico.

^a Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Civil, liaengenhariacivil@hotmail.com, Rua 33 n° 256, CEP: 15385-000, Ilha Solteira-SP, Brasil.

^b Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Civil, mbarbosa@dec.feis.unesp.br, Alameda Bahia n° 550, CEP: 15385-000, Ilha Solteira-SP, Brasil.

1. Introdução

O concreto auto-adensável (CAA) já está sendo empregado nas indústrias de pré-fabricados na maioria dos países industrializados, e vem ganhando cada vez mais espaço na produção das indústrias brasileiras. Essa propagação do CAA pode ser explicada devido à existência de uma série de melhorias no seu processo de aplicação.

Nunes [1] enfatiza que a propriedade auto-nivelante do CAA diminui sensivelmente a necessidade de desempenho das superfícies nos elementos horizontais e de acabamento nas superfícies verticais, as quais se apresentam suaves, uniformes e livres de imperfeições. Na elaboração de elementos pré-moldados devem-se considerar dois fatores: a produção em larga escala com elementos cíclicos, e a adoção de técnicas que garantam boa qualidade aos produtos finais.

A indústria de pré-fabricados tem como uma de suas características de produção, a confecção de elementos estruturais em larga escala, empregando para tanto, métodos que permitam acelerar o ganho da resistência à compressão do concreto. Um desses métodos vem a ser a utilização do processo de cura térmica a vapor, que permite acelerar o processo de hidratação do cimento, levando ao enrijecimento dos elementos estruturais, facilitando as etapas de desforma e manuseio dos elementos estruturais.

Pouco se conhece sobre o comportamento de concretos auto-adensáveis quando são submetidos a cura térmica e, além disso, sabe-se que as indústrias de pré-fabricados não utilizam frequentemente cimentos com alto teor de adição mineral, como o cimento Portland de alto-forno e, é raro pesquisas que envolvam a confecção de traços de concreto auto-adensável direcionados para as indústrias de pré-fabricados que utilizam a cura térmica a vapor, empregando este tipo de cimento.

Habitualmente são utilizados nestas indústrias de concretos, cimentos mais puros, isto é, com uma substituição mínima de subprodutos (adições minerais), por serem cimentos com uma alta resistência inicial. Sendo assim, com base neste contexto justificou-se por ampliar as pesquisas nesta área e, englobando todos estes tópicos, o objetivo deste trabalho foi direcionado para avaliar a resistência à compressão de dois CAA's distintos, quando submetidos a diferentes condições de cura, cura térmica (65°C e 80°C) e cura normal (de acordo com a NBR 5738:2003 [2]), e ainda, utilizando para estes concretos, cimentos Portland de alto-forno, que utilizam a escória como adição mineral.

1.1 Justificativa

A substituição do cimento de alta resistência inicial, denominado pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) como CPV – ARI, pode ser uma oportunidade de melhorar a sustentabilidade do setor industrial, pois, de maneira geral, o cimento Portland é um produto caro e que utiliza uma grande quantidade de energia para ser produzido. Sendo que, uma substituição parcial do cimento por subprodutos industriais, que normalmente estão disponíveis a um custo menor, representaria uma economia para as indústrias e com aproveitamento mais nobre, que é o caso dos cimentos utilizados nesta pesquisa, o cimento Portland composto (CP II E) onde a adição varia de 6% a 34%, em massa, e é especificado pela NBR 11.578:1991 [3] e o cimento Portland de alto-forno

(CP III) onde a adição varia de 35% a 70%, em massa, sendo especificado pela NBR 5735:1991 [4].

E, além disto, para confeccionar concretos auto-adensáveis, sabe-se que é necessário um teor maior de pasta e, conseqüentemente, uma maior quantidade de cimento, quando comparado com um concreto convencional. Essa quantidade maior de pasta é essencial para se obter a trabalhabilidade que esta mistura necessita e, sendo assim, a elaboração de concretos com estes cimentos pouco utilizados pelas indústrias se mostrou um estudo coerente com os conceitos de sustentabilidade que todas as empresas de excelência buscam seguir.

1.2 Concreto auto-adensável

O concreto auto-adensável (CAA), segundo Okamura [5], é aquele capaz de manter sua habilidade passante, preenchendo o interior de formas altamente armadas através, unicamente, de seu peso próprio. É um material denso, adequadamente homogêneo e que não tem necessidade de compactação. Resiste completamente à segregação e mantém sua composição estável durante seu transporte e concretagem, resultando num produto de característica mais uniforme e isento de defeitos.

O CAA se diferencia do concreto convencional por apresentar três propriedades básicas no seu estado fresco, a saber: sua habilidade passante, ou seja, sua habilidade de preenchimento dos espaços vazios, capacidade de passar por restrições e sua capacidade de resistir à segregação (WÜSTHOLZ [6]).

Ele deve satisfazer estes requisitos os quais são analisados através de ensaios próprios, que consideram sua capacidade de espalhamento e a fluidez. No estado fresco, o concreto auto-adensável apresenta desde o início de sua elaboração (fases da pasta, argamassa e posteriormente o concreto) um comportamento reológico do tipo de um fluido não-newtoniano, Binghamiano, ou até mesmo Herschel-Bulkley.

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para melhor conhecer e compreender o comportamento do CAA quer seja no estado fresco como no estado endurecido. Alguns países como os Estados Unidos, Japão e a comunidade Européia já se preocuparam em normalizar os ensaios de caracterização do CAA. No Brasil, a primeira norma sobre o concreto auto-adensável entrou em vigor no ano de 2010, a NBR 15823:2010 [7].

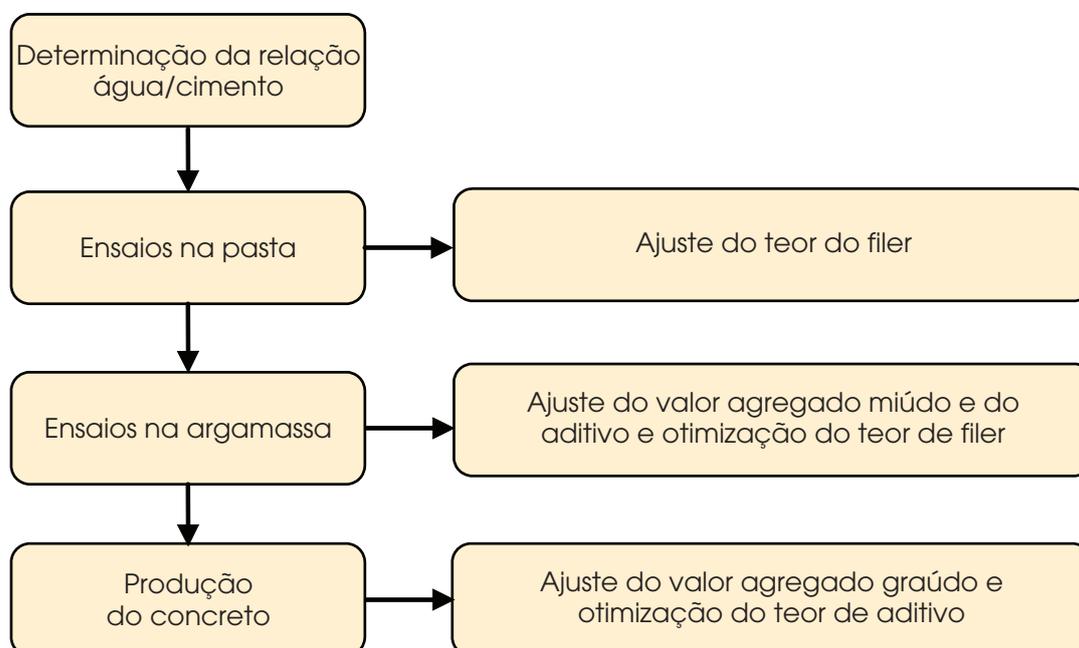
1.3 Método de dosagem do concreto auto-adensável

Alencar [8], Tutikian [9] e Melo [10] são alguns dos pesquisadores brasileiros que propõem métodos de dosagem para o CAA com eficácia comprovada. Dentre estes, o método proposto por Melo [10] aborda os aspectos reológicos na dosagem do concreto, buscando avaliar e validar os ensaios da pasta, argamassa e posteriormente do concreto no seu estado fresco. Foi esta última metodologia – denominada Repete-Melo, ilustrada na Figura 1, a adotada na elaboração desta pesquisa. Foram realizados estudos reológicos da pasta, da argamassa como do concreto no estado fresco, visando à utilização desse concreto numa indústria de pré-moldados.

1.4 Cura térmica

A cura térmica à vapor utiliza uma temperatura superior à temperatura ambiente, sendo esse “aquecimento” o objetivo principal

Figura 1 - Fluxograma do método de dosagem Repette-Melo (MELO (10))



para acelerar as reações de hidratação do cimento, tendo como resultado o ganho de resistência, para que o concreto possa ser manuseado nas primeiras idades.

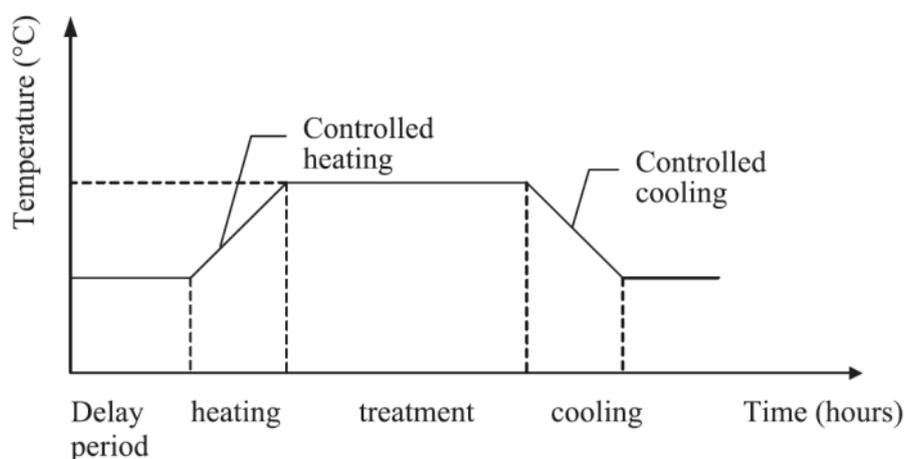
Para Asaga *et al.* [11] o benefício imediato da cura térmica é acelerar a resistência mecânica inicial do concreto. Quando comparado à cura normal, consegue-se observar uma redução na resistência

final. Esta redução pode ser atribuída ao desenvolvimento de uma microestrutura modificada.

Camarini [12] sugere a divisão da cura térmica em quatro etapas:

a) **Espera (período preliminar)**: período de tempo decorrido entre a mistura do aglomerante com a água e o início do aquecimento. Deve ser igual ao tempo de pega do cimento.

Figure 2 - Typical steam curing cycle (EL DEBS (13))



- b) **Elevação da temperatura:** deve ser controlada até atingir o valor desejado. A taxa recomendada é de 20°C/h.
- c) **Patamar isotérmico (período de temperatura constante):** período em que a temperatura desejada deve ser mantida por algumas horas. Esse patamar é variável em função do tipo de aglomerante empregado.
- d) **Esfriamento:** é a redução da temperatura até que se atinja a temperatura ambiente. A taxa recomendada é de 20°C/h.

As mesmas etapas do ciclo proposto por Camarini [12] são sugeridas por El Debs [13] diferenciando o ciclo térmico apenas com relação ao gradiente de esfriamento, da ordem de 10°C/h, esse ciclo térmico é ilustrado na Figura 2.

Os ciclos térmicos são adotados de forma que o concreto adquira as resistências definidas em projeto, respeitando o tempo disponível para sua realização. O ciclo envolve a etapa de pré-aquecimento, num intervalo de 2 h a 5 h, seguida de aquecimento à taxa de 20°C /h a 44°C /h até atingir a temperatura máxima do ciclo, compreendida entre 50°C e 82°C .

Em seguida é realizado o resfriamento do material, de modo que o tempo total do ciclo não ultrapasse 18 h (ACI [14]). Türkel e Alabas [15] afirmam que, quando for necessária a obtenção de valores elevados de resistências iniciais para critérios de desforma, pode-se empregar uma temperatura máxima de cura da ordem de 85°C.

1.5 Equações das resistências no patamar de cura e nas idades avançadas

Segundo Camarini [12] os ganhos de resistência em idades iniciais (após o término do patamar isotérmico) ou finais (nas idades requeridas) depende do ciclo de cura e temperatura máxima adotada. Para tanto, foi feita uma análise comparativa das resistências obtidas ao fim do ciclo de cura térmica a vapor ou seja, resistência obtida imediatamente após o término do patamar isotérmico e antes do resfriamento do concreto e após o ciclo completo de cura térmica (resistência obtida após o término do patamar isotérmico e após o resfriamento do concreto), nas idades de 3, 7, 28, 56 e 91 dias, com os concretos submetidos à cura normal, em função do tipo de cimento empregado, temperatura de cura e tempo no patamar isotérmico, onde foram consideradas as seguintes equações de correlação:

$$R(n) = \frac{F_{IC-CT}}{F_{C(i)-CN}} \quad (1)$$

$$R(n) = \frac{F_{AC(i)-CT}}{F_{C(i)-CN}} \quad (2)$$

Onde:

R(n): Fator de correlação, sendo n de 1 a 5 para a equação 1 e de 6 a 10 para a equação 2;

F_{IC-CT}: Resistência imediata ao ciclo (cura térmica),(conforme indicado na figura 2);

F_{AC(i)-CT}: Resistência após o ciclo (cura térmica), (conforme indicado na figura 2), sendo i as idades de ruptura: 3, 7, 28, 56 e 91;

F_{C(i)-CN}: Resistência do concreto (cura úmida), sendo i as idades de ruptura: 3, 7, 28, 56 e 91.

1.6 Efeitos da temperatura de cura nos concretos com cimentos Portland de alto-forno

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) determina o uso da escória em dois tipos de cimento como adição mineral, e a porcentagem a ser adicionada para sua confecção pode ser variada e está relacionada ao tipo de cimento produzido.

Para o cimento Portland composto (CP II E) a adição varia de 6% a 34%, em massa, e é especificado pela NBR 11.578:1991 [3]. Já o cimento Portland de alto-forno (CP III) a adição varia de 35% a 70%, em massa, sendo especificado pela NBR 5735:1991 [4].

Segundo Camarini [12] o grau de hidratação do cimento com escória é inicialmente mais lenta, de 6% a 8,5% aos 28 dias, quando comparada à hidratação do cimento Portland comum, sendo que essa atividade pode ser acelerada, utilizando alguns tipos de procedimentos, como a elevação da temperatura de cura.

De maneira geral, o cimento Portland é um produto caro e requer um quantidade de energia muito grande para ser produzido, sendo que uma substituição parcial do cimento por subprodutos industriais, que normalmente estão disponíveis a um custo menor, representaria uma economia para as indústrias e com aproveitamento mais nobre (CAMARINI [12]).

A indústria de pré-fabricados de concreto usualmente utiliza um cimento mais puro, isto é, com uma substituição mínima de subprodutos, especificado como cimento Potland de alta resistência inicial (CPV-ARI). Com a utilização de cimentos Portland de Alto-forno (CP II E-32 e CP III 40-RS) as indústrias de pré-moldados teriam como vantagem a utilização de cimentos com economia de clínquer, o que justifica ampliar as pesquisas nesta área.

Tabela 1 - Valores de caracterização do fíler

Dimensão média (µm)	Dimensão abaixo do qual se encontram 10% das partículas (µm)	Dimensão abaixo do qual se encontram 90% das partículas (µm)	Material passante na peneira no 200 (%)	Massa específica (g/cm ³)
45	14,4	82	61,03	2,86

2. Materiais e programa experimental

2.1 Agregado miúdo

Foi utilizado como agregado miúdo a areia média proveniente da região Noroeste Paulista, com massa específica 2,61 g/cm³, determinada segundo a NBR NM 53:2003 [16], dimensão máxima característica igual a 2,36 mm e módulo de finura 2,01 mm, conforme a NBR NM 248 [17].

2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi uma brita basáltica, com massa es-

pecífica 2,76 g/cm³, determinada segundo a NBR NM 53:2003 [16], dimensão máxima característica igual a 19 mm e módulo de finura 6,31 mm, conforme a NBR NM 248 [17].

2.3 Fíler basáltico

O fíler utilizado foi um material de origem basáltica, e o seu efeito físico está relacionado com sua finura, que contribui para preenchimento dos vazios entre os agregados graúdos e miúdos (TAYLOR [18]). A respeito do efeito químico, o fíler foi utilizado como um material inerte nesse trabalho.

Foi feita uma análise de granulometria a laser realizado pela ABCP

Tabela 2 - Caracterização físico-química dos cimentos CP II E-32 e CP III 40-RS

Análise Química (%)	CP II E-32	CP III 40-RS	Propriedades Físicas	CP II E-32	CP III 40-RS
Perda ao fogo	4,33	3,47	Finura Peneira 200 (% retida)	4,93	0,28
Insolúveis	1,63	0,7	Finura Peneira 325 (% retida)	16,8	1,02
SiO ₂	20,75	24,52	Superf. Específica Blaine (cm ² /g)	4031	4180
Fe ₂ O ₃	2,29	2,29	Densidade Aparente (g/cm ³)	1,09	1,01
Al ₂ O ₃	8,05	9,49	Densidade Aparente (g/cm ³)	3,05	2,99
CaO	57,45	53,12	Início de pega (h:min)	02:43	02:51
MgO	1,89	3,12	Fim de pega (h:min)	04:06	04:52
SO ₃	2,44	1,98	Expansão autoclave (%)	0,032	0,003
Na ₂ O	0,26	0,26	Tensão (MPa) 03 dias	19,4	23,8
K ₂ O	0,58	0,58	Tensão (MPa) 07 dias	24,4	30,7
Equiv. alcalino Na ₂ O	0,64	0,64	Tensão (MPa) 28 dias	32,1	37,9
Cal livre em CaO	1,69	1,06	a/c	0,48	0,48

Tabela 3 - Composição do CAA

Designação Concreto	Relação a/c	Massa cimento (Kg/m ³)	Massa filer (Kg/m ³)	Massa areia (Kg/m ³)	Massa Brita (Kg/m ³)	Teor de aditivo (l)	f ₂₈ (MPa)
CAA CII E-32	0,40	478,90	202,07	704,61	816,76	2,07	50,30
CAA CIII 40 RS	0,48	450,86	205,94	678,11	875,10	2,10	44,00

– Associação Brasileira de Cimento Portland no filer basáltico empregado nesta pesquisa, onde apresentou 60,1% de partículas com diâmetro inferior a 75 µm e diâmetro médio de 45µm.

A fração do material retida na peneira 75 µm foi considerada como parte integrante do agregado miúdo, o qual teve seu volume corrigido em função dessa incorporação. Na Tabela 1 são apresentados os resultados da caracterização do filer.

2.4 Cimento Portland

Foi utilizado como aglomerante hidráulico os cimentos Portland de Alto-Forno, denominados e classificados pela norma brasileira como cimento CP II E-32 e CP III 40-RS. As composições potenciais dos cimentos e as características físicas da pasta estão detalhadas nas Tabelas 2.

2.5 Composição do Concreto Auto-adensável

A composição do concreto auto-adensável foi dividida em cinco etapas e seu procedimento experimental foi baseado na metodologia de Repete-Melo – Melo [10]. Contudo, foi necessário adaptações em algumas etapas do procedimento, conforme a variação dos materiais empregados na confecção deste concreto. Essas etapas são descritas e numeradas cronologicamente a seguir.

1. Inicialmente foi feita a seleção e caracterização dos materiais escolhidos para confecção do CAA;
2. O segundo passo foi confeccionar um concreto convencional utilizando o método IPT/EPUSP, para encontrar uma relação a/c que atendesse a resistência à compressão requerida de 40 MPa aos 28 dias. Foi determinada nesse ensaio uma relação a/c para cada tipo de cimento empregado na pesquisa;
3. Com o valor da relação a/c para cada tipo de cimento, deu-se início a etapa da pasta, onde foi realizado o ajuste do filer e o ajuste de aditivo, sendo estes ajustes encontrados pelo ensaio de Cone de Marsh e o ensaio com o Reômetro;
4. Passou-se então para a etapa da argamassa, onde foi feito o ajuste do agregado miúdo, um melhor ajuste do filer e do aditivo. O procedimento adotado foi o ensaio de espalhamento, de funil-V, o ensaio com o Reômetro e o acompanhamento do desenvolvimento dos valores de resistência à compressão dessas misturas;
5. Por fim, seguiu-se para o ensaio no concreto, onde foi feito apenas o ajuste do agregado graúdo e do aditivo. O procedimento adotado foi o ensaio de espalhamento (slump-flow),

funil-V, caixa-L, segregação (*Column technique*) e a avaliação das propriedades mecânicas do concreto verificando o atendimento aos valores requeridos inicialmente.

Na Tabela 3 está descrito a composição do CAA e na Tabela 4 é apresentado os resultados obtidos para as duas composições de CAA ensaiadas assim como a faixa dos parâmetros fixados pela NBR 15823 (2010) Será utilizada, para as designações a seguir, a nomenclatura de CAA1 para o concreto confeccionado com cimento CP II E-32 e, CAA2 para o concreto confeccionado com cimento CP III 40-RS.

A Figura 3 ilustra os ensaios de espalhamento, funil em V, caixa em L e segregação (*Column technique*), respectivamente, realizadas

Figura 3 – (a) Ensaio de espalhamento (slump-flow), (b) Funil-V, (c) Caixa-L e (d) segregação (Column technique)

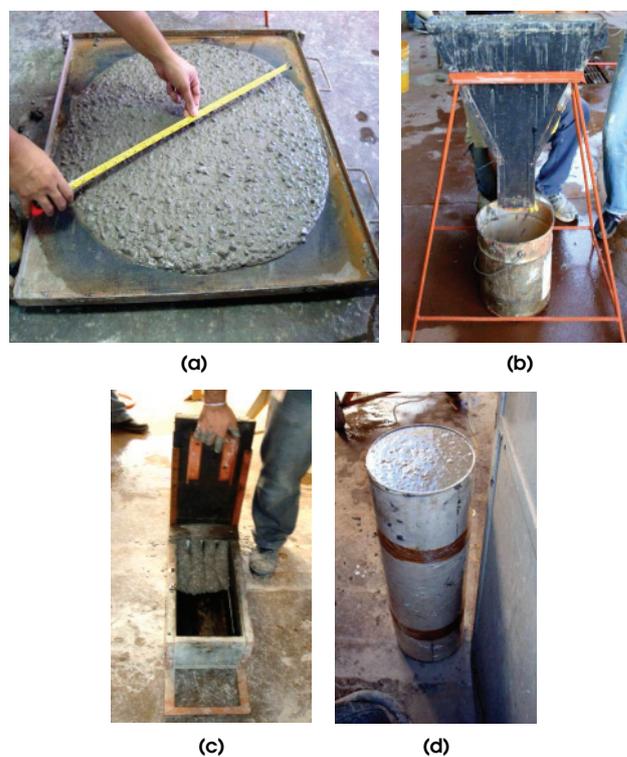


Tabela 4 - Limites de aceitação e valores obtidos do CAA de acordo com método de ensaio

Métodos de ensaio	Valores limites segundo a NBR 15823	Concreto CAA1 CAA CPII E32	Concreto CAA2 CAA CPIII 40 RS
Espalhamento (d)	650 a 750 mm	705 mm	720 mm
Funil -V (t)	< 10s	6,6s	5,5s
Caixa-L (H_2/H_1)	$\geq 0,8$	0,92	0,97
Segregação	< 10%	8%	0%

no decorrer desta pesquisa e também descritas em SANTOS [19].

2.6 Ensaio de cura térmica à vapor

A cura térmica foi realizada em câmara térmica de vapor à pressão

Figura 4 - Equipamento de cura térmica a vapor em funcionamento com os corpos-de-prova distribuídos nas prateleiras



atmosférica, de acordo com o gradiente térmico descrito a seguir.

- Tempo de espera (t_0): coincide com o tempo de pega do cimento. O tempo de pega do concreto determinado foi de 3 h e 30 min para os dois tipos de cimentos utilizados.

- Gradiente de elevação da temperatura (t_1): Corpos-de-prova dispostos no equipamento de câmara térmica à vapor (Figura 4), e submetidos a elevação controlada da temperatura de no máximo 25°C/h, .

- Patamar isotérmico (t_2) = manutenção da temperatura máxima de cura. Foi adotado períodos de 4, 6 e 8 horas e temperaturas de cura de 65°C e 80°C. Fim do período do patamar isotérmico três corpos de prova foram retirados do equipamento de cura térmica e rompidos, os quais são denominados de FIC-CT (rupturas imediatas ao ciclo).

- Gradiente de resfriamento (t_3): decréscimo da temperatura controlado de 18 °C/h. Ao final de cada ciclo, os corpos-de-prova foram desmoldados e colocados em câmara úmida saturada, permanecendo nesta câmara até as idades estipuladas para as rupturas (3, 7, 28, 56 e 91 dias). Esses corpos de prova foram denominados de FAC-CT (rupturas após o ciclo).

Foram realizados 12 (doze) ensaios de cura térmica, 6 (seis) para cada tipo de cimento, variando-se a temperatura do patamar isotérmico: 65°C e 80°C, e o período deste patamar: 4, 6 e 8 horas, como demonstrado na Tabela 5.

Para cada ensaio realizado, os concretos foram submetidos à cura normal, onde os corpos-de-prova permaneceram nos moldes por 24 horas em temperatura ambiente e, ao final deste período foram desmoldados, permanecendo em câmara úmida saturada para serem rompidos.

3. Resultados e discussões

A partir do programa de ensaios proposto, foram obtidas as resistências à compressão das amostras e estabelecidas as correlações entre as resistências imediatas ao ciclo e nas idades avançadas, para o CAA elaborado com os diferentes tipos de cimento.

3.1 Concreto auto-adensável elaborado com cimento CP II E-32

A Tabela 6 é referente à análise das resistências imediatas ao ciclo, e esboça a análise das variações relativas dos resultados em relação às resistências do CAA submetido à cura normal.

Tabela 5 – Detalhamento dos patamares de regime isotérmico nos concretos ensaiados

Período de Espera		Aquecimento (25°C/h)		Tempo de Cura		Resfriamento (18°C/h)		Ciclo Total
Temp. (°C)	Tempo (h:min)	Temp. (°C)	Tempo (h:min)	Temp. (°C)	Tempo (h:min)	Temp. (°C)	Tempo (h:min)	Tempo (h:min)
27	03:30	27 - 65	01:30	65	4	65 - 30	02:00	11:00
27	03:30	27 - 65	01:30	65	6	65 - 30	02:00	13:00
27	03:30	27 - 65	01:30	65	8	65 - 30	02:00	15:00
27	03:30	27 - 80	02:10	80	4	80 - 30	02:50	12:30
27	03:30	27 - 80	02:10	80	6	80 - 30	02:50	14:30
27	03:30	27 - 80	02:10	80	8	80 - 30	02:50	16:30

Os valores da análise das variações relativas dos resultados, na Tabela 6, onde se correlacionou os resultados das resistências imediatas ao ciclo (ao final do ciclo de cura térmica a vapor e antes do resfriamento) pelas resistências dos CAA em cura ambiente, mostraram-se coerentes, pois, como era esperado, foi possível notar um acréscimo do valor de resistência dos concretos com o aumento da temperatura e no tempo do patamar isotérmico. Nessas condições, o ciclo de cura que apresentou maior resistência inicial, para a temperatura de 65°C foi o patamar isotérmico de 6 horas, isto é, neste pequeno intervalo de tempo foi possível obter, em relação aos valores de cura normal, 54% da resistência obtida aos 3 dias (R1 = 54%), e 37% da resistência alcançada aos 28 dias (R3 = 37%). Para a temperatura de 80°C, foi o patamar isotérmico de 8 horas, isto é, neste pequeno intervalo de tempo foi possível obter, em relação aos valores de cura normal, 53%

da resistência obtida aos 3 dias (R1 = 53%), e 39% da resistência alcançada aos 28 dias (R3 = 39%).

A Tabela 7 é referente à análise das resistências após o ciclo completo, e esboça a análise das variações relativas dos resultados em relação às resistências do CAA submetido à cura normal.

Ao observar os valores da análise das variações relativas dos resultados nas idades avançadas, indicadas na Tabela 7, os melhores resultados de desempenho do concreto foram para a temperatura de 65°C com o patamar isotérmico de 4 horas, isto é, com perdas abaixo de 6% em todas as idades (R6 = 97%; R7 = 97%; R8 = 95%; R9 = 101%; R10 = 94%). A temperatura de 80°C indicou grandes perdas de resistência se comparado aos valores obtidos na temperatura de 65°C, com os resultados da análise das variações relativas para todos os patamares isotérmicos menores que 80%, isto é, perdas acima de 20% nos valores de resistência.

Tabela 6 – Análise da resistência no patamar de cura do CAA

Condição	Patamar (h)	Resistência imediata ao ciclo (MPa)	Análise das resistências imediatas ao ciclo de cura térmica - Cimento CP II E-32				
			R1 (%)	R2 (%)	R3 (%)	R4 (%)	R5 (%)
Cura 65°C	4	17,4	50	41	34	33	30
	6	18,8	54	44	37	35	32
	8	18	52	42	36	34	31
Cura 80°C	4	18,2	52	43	36	34	31
	6	18,4	53	43	36	34	32
	8	19,6	53	46	39	37	34
Cura ambiente (MPa)		-	$f_{c3} - 34,9$	$f_{c7} - 42,5$	$f_{c28} - 50,7$	$f_{c56} - 53,4$	$f_{c91} - 58,1$

Tabela 7 - Análise da resistência nas idades avançadas do CAA

Condição	Patamar (h)	Análise das resistências após o ciclo de cura térmica (MPa) - Cimento CP II E-32									
		3 dias (72h)	R6 (%)	7 dias (168h)	R7 (%)	28 dias (672h)	R8 (%)	56 dias (1344h)	R9 (%)	91 dias (2184h)	R10 (%)
Cura 65°C	4	33,9	97	40,4	95	48,5	95	54,2	101	54,7	94
	6	28,2	81	36,3	85	44,7	88	45,5	85	49,5	85
	8	29,5	85	34,5	81	40,5	80	40,6	76	43,6	75
Cura 80°C	4	22,4	64	26,4	62	37,2	73	41,6	8	42,5	73
	6	22,3	64	26,3	62	36,4	72	40,4	76	45,6	78
	8	21,7	62	27,8	65	32,5	64	32,6	61	33,1	57
Cura ambiente (MPa)		f_{c3} -34,9	-	f_{c7} -42,5	-	f_{c28} -50,7	-	f_{c56} -53,4	-	f_{c91} -58,1	-

3.2 Concreto auto-adensável elaborado com cimento CP III 40-RS

Também foram obtidas as resistências à compressão das amostras e estabelecidos as correlações entre as resistências imediatas ao ciclo e nas idades avançadas, para o CAA com cimento CP III 40-RS, assim apresentado na Tabela 8 e na Tabela 9.

A Tabela 8 é referente à análise das resistências imediatas ao ciclo, e esboça a análise das variações relativas dos resultados em relação às resistências do CAA submetido à cura normal.

A análise das variações relativas dos resultados das resistências

imediatas ao ciclo para este CAA se mostrou coerente, pois, como era esperado, foi possível notar um acréscimo do valor de resistência dos concretos com o aumento da temperatura e no tempo do patamar isotérmico. Nessas condições, o ciclo de cura que apresentou maior resistência inicial, para a temperatura de 65°C foi o patamar isotérmico de 8 horas, isto é, neste pequeno intervalo de tempo foi possível obter, em relação aos valores de cura normal, 56% da resistência obtida aos 3 dias ($R1 = 56\%$), e 29% da resistência alcançada aos 28 dias ($R3 = 29\%$). Para a temperatura de 80°C, também foi o patamar isotérmico de 8 horas, isto é, neste pequeno intervalo de tempo foi possível obter, em relação aos valores de cura normal,

Tabela 8 - Análise da resistência no patamar de cura do CAA

Condição	Patamar (h)	Resistência imediata ao ciclo (MPa)	Análise das resistências imediatas ao ciclo de cura térmica - Cimento CP III 40-RS				
			R1 (%)	R2 (%)	R3 (%)	R4 (%)	R5 (%)
Cura 65°C	4	10,1	45	30	23	22	21
	6	10,2	45	30	23	22	21
	8	12,8	56	38	29	28	26
Cura 80°C	4	10,9	48	32	25	24	23
	6	11,3	50	33	26	25	23
	8	14,1	62	42	32	31	29
Cura ambiente (MPa)		-	f_{c3} -22,7	f_{c7} -33,8	f_{c28} -44	f_{c56} -45,7	f_{c91} -48,4

Tabela 9 - Análise da resistência nas idades avançadas do CAA

Condição	Patamar (h)	Análise das resistências após o ciclode cura térmica (MPa) - Cimento CP III 40-RS									
		3 dias (72h)	R6 (%)	7 dias (168h)	R7 (%)	28 dias (672h)	R8 (%)	56 dias (1344h)	R9 (%)	91 dias (2184h)	R10 (%)
Cura 65°C	4	22,9	101	33,2	98	41,2	94	37,3	82	43,5	90
	6	23,9	105	30,7	91	43	98	43,6	95	44,8	93
	8	23,9	105	29,7	88	40	91	42,9	94	46,9	97
Cura 80°C	4	26,2	115	29,6	88	36	82	37,5	82	39,9	82
	6	24,1	106	26,1	77	32,1	71	32,6	71	35,8	74
	8	18,8	83	20,2	60	23,2	53	29,9	65	30	62
Cura ambiente (MPa)		f_{c3} -22,7	-	f_{c7} -33,8	-	f_{c28} -44	-	f_{c56} -45,7	-	f_{c91} -48,4	-

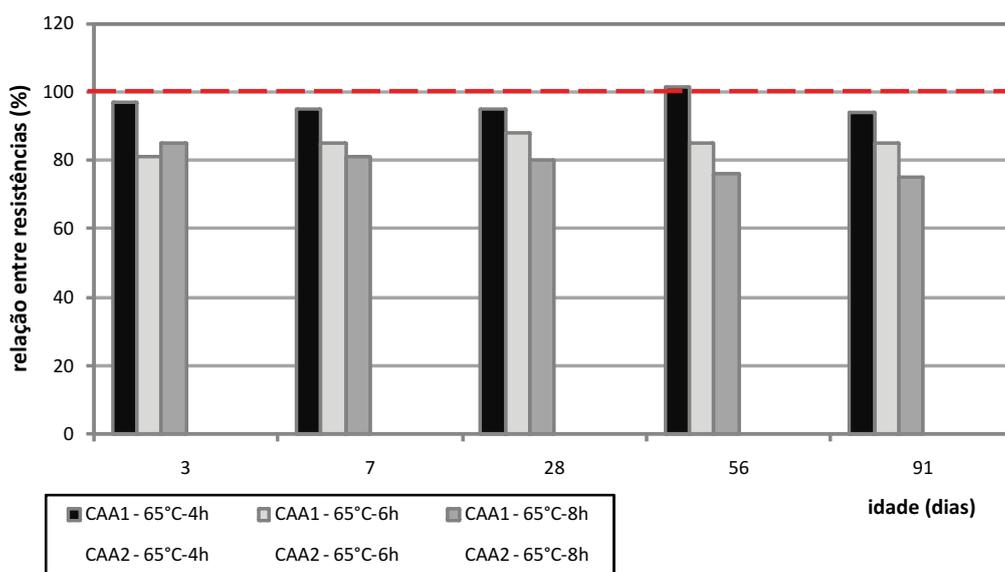
62% da resistência obtida aos 3 dias (R1 = 62%), e 32% da resistência alcançada aos 28 dias (R3 = 32%).

A Tabela 9 é referente à análise das resistências após o ciclo, e esboça a análise das variações relativas dos resultados em relação às resistências do CAA submetido à cura normal.

Ao observar os valores das análises das variações relativas dos resultados nas idades avançadas, indicadas na Tabela 9, o melhor resultado de desempenho do concreto foi para a temperatura de

65°C, com o patamar isotérmico de 6 horas, isto é, tendo um ganho de resistência de 5% aos 3 dias (R6 = 105%) e uma perda de apenas 2% aos 28 dias (R8 = 98%). Apesar do desempenho do concreto para a temperatura de 80°C para o patamar isotérmico de 4 horas ter tido um ganho de resistência de 15% aos 3 dias (R6 = 115%), quando observado as resistências nas idades de 28, 56 e 91 dias, a perda de resistência foi de 18% para estas idades (R8 = 82%; R9 = 82%; R10 = 82%).

Figura 5 - Análise comparativa entre os concretos estudados (CAA1: concreto confeccionado com cimento CP II E-32 e CAA2: concreto confeccionado com cimento CP III 40-RS)



3.3 Análise comparativa entre o CAA com cimento CP II E-32 e o CAA com cimento CP III 40-RS para a temperatura de 65°C

Após a análise individual dos concretos, foi feita uma análise comparativa entre os dois CAA's, onde foram avaliados seus rendimentos em relação aos valores de resistência à compressão para os concretos submetidos à cura normal, através da análise das variações relativas dos resultados.

Na Figura 5 é apresentado o gráfico de barras com a análise comparativa dos dois concretos das resistências após o ciclo, na temperatura de 65°C, para os três tempos de cura estudados (4 h, 6 h e 8 h).

A porcentagem de 100% é o valor real da resistência à compressão dos concretos submetidos à cura normal, sendo indicada quando o concreto submetido à cura térmica der o mesmo valor de resistência à compressão do concreto submetido à cura normal e se, a porcentagem for maior que 100%, quer dizer que o concreto submetido à cura térmica apresentou um valor maior de resistência do que o valor encontrado para o mesmo concreto submetido à cura normal, e vice-versa.

Sendo assim, apesar do CAA2 indicar menores valores de resistência à compressão nos resultados obtidos nesta pesquisa quando comparado com o CAA1, ao analisar o rendimento do CAA2 em relação a sua resistência à cura normal, pode-se perceber que seu rendimento para a temperatura de 65°C apresentou ganhos significativos, mais elevados do que os ganhos de resistência do CAA1.

3.4 Análise comparativa entre o CAA com cimento CP II E-32 e o CAA com cimento CP III 40-RS para a temperatura de 80°C

Utilizando o mesmo procedimento de análise de dados descrito no item 6.3, a Figura 6 apresenta o gráfico de barras com a análise comparativa dos dois concretos das resistências após o ciclo, na temperatura de 80°C, para os três tempos de cura estudados (4 h, 6 h e 8 h).

Sendo a porcentagem de 100% o valor real da resistência à compressão dos concretos submetidos à cura normal, nota-se que o CAA2, para temperaturas mais elevadas, apresentou um rendimento bem acima do rendimento do CAA1. Isso demonstra que o CAA2 apresenta melhor desempenho com regimes isotérmicos mais longos.

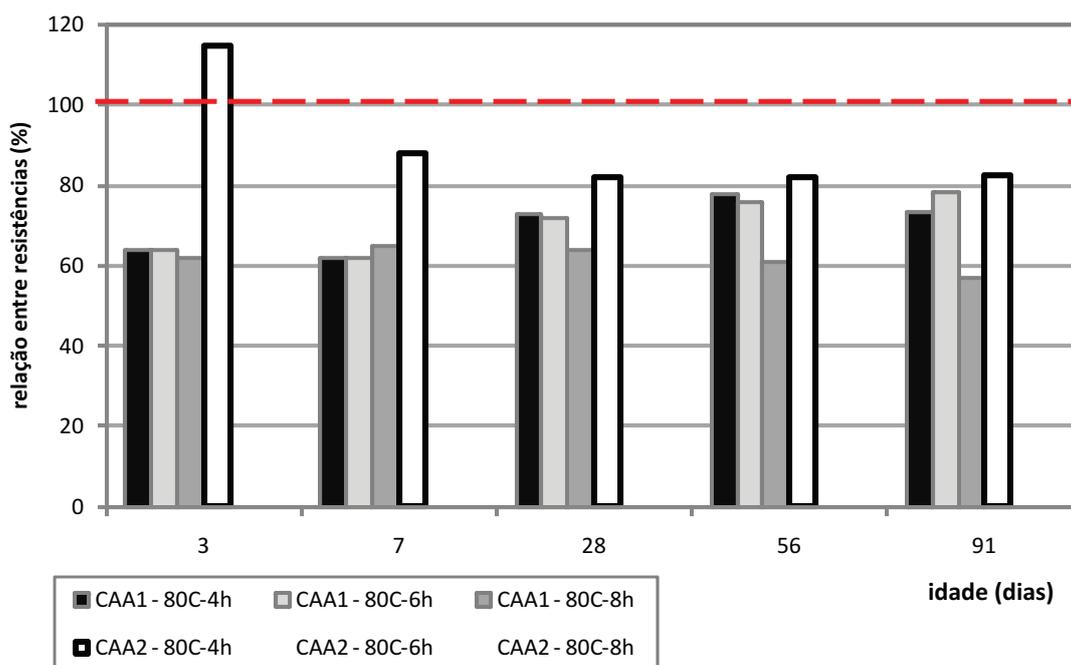
4. Conclusões

Este artigo apresenta a verificação do desempenho de concretos auto-adensáveis utilizando cimentos Portland com escória granulada de alto-forno, quando submetidos à cura térmica a vapor.

Foi constatado que o concreto auto-adensável apresentou resultados finais semelhantes aos dos concretos convencionais quando emprega-se a cura térmica à vapor, ou seja não houve alteração nos resultados obtidos que justifiquem a influência do CAA nos resultados finais quando comparados ao concreto convencional.

Os resultados das resistências à compressão dos concretos indicaram que, como esperado, com o aumento da temperatura, hou-

Figura 6 - Análise comparativa entre os concretos estudados (CAA1: concreto confeccionado com cimento CP II E-32 e CAA2: concreto confeccionado com cimento CP III 40-RS)



ve uma aceleração da cinética das reações de hidratação, favorecendo o ganho de resistência dos concretos nas idades iniciais. A etapa do regime isotérmico está diretamente relacionada com a temperatura máxima de cura, e o tipo de cimento utilizado.

Os dois tipos de concretos estudados, cujas composições se diferem quanto ao tipo de cimento empregado, apresentaram melhor desempenho com regimes isotérmicos mais longos e, quando submetidos a temperaturas menores, os regimes curtos proporcionam melhores resistências finais.

Ao aumentar a temperatura e prolongar o período de cura, as resistências iniciais melhoraram, mas não houve crescimento de resistência com a idade.

Cada concreto avaliado apresentou um desempenho de cura térmica a vapor próprio, não podendo ser estabelecido um ciclo de cura único para os dois tipos de CAA estudados.

Foi possível concluir que, em termos globais, o concreto com cimento CP II E-32 apresentou a 65°C, para o patamar isotérmico de 4 horas o melhor valor de resistência a compressão quando submetido a estas condições de cura.

O concreto com cimento CP III 40-RS apresentou a 65°C, para o patamar isotérmico de 6 horas o melhor valor de resistência a compressão quando submetido a estas condições de cura.

Não devem ser esperados crescimentos significativos de resistência do concreto ao longo do tempo após a utilização de temperaturas de cura altas, pois essa temperatura de cura afeta o desempenho dos aglomerantes.

Ao comparar os resultados de resistência à compressão dos dois tipos de concretos confeccionados após o ciclo de cura, para a temperatura de 65°C, foi possível obter, em relação aos valores de cura normal, a maior parte dos valores acima de 80%. Já para a temperatura de 80°C, a maior parte dos valores ficou abaixo de 80%.

Da análise comparativa entre os dois concretos, concluiu-se que o cimento CP III 40-RS apresentou melhor desempenho com regimes isotérmicos mais longos.

Concluiu-se ainda que, ao analisar as propriedades físicas e químicas de cada cimento, o cimento com maior quantidade de escória (CP III 40-RS) pode ter apresentado o melhor desempenho em regimes mais longos justamente por ter em sua composição uma maior quantidade de escória (de 35% a 70% de escória em sua composição), pois, as reações de hidratação dos cimentos de escória têm sua velocidade controlada principalmente pela quantidade e reatividade da escória, tipo e concentração do ativador e temperatura.

Ao observar a análise física dos cimentos, o cimento CP III 40-RS tem uma quantidade maior de finos (passante na peneira #325), e também uma resistência inicial da pasta maior quando comparado com o cimento CP II E-32. Esses fatores podem ser relacionados com o melhor desempenho deste cimento, tanto nas idades iniciais como nas finais (utilizando o processo de cura).

Alguns estudos mais detalhados do cimento e do concreto, como na difração de raios X e na microscopia eletrônica de varredura, podem esclarecer com maior exatidão, a influência das propriedades de cada cimento nos resultados finais de cura dos concretos.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Energética do Estado de São Paulo – CESP pela disponibilização dos resultados dos ensaios realizados no Laboratório CESP de Engenharia Civil – LCEC em Ilha Solteira-SP.

Agradecemos também ao Laboratório de Engenharia Civil da UNESP campus de Ilha Solteira pela disponibilidade e auxílio.

A FAPESP pela ajuda financeira do projeto de pesquisa.

A HOLCIM pelo fornecimento do cimento e a SIKA pela doação do aditivo superplastificante.

6. Referências bibliográficas

- [01] NUNES, S. C. B. Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades. Pós-graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 198p, 2001.
- [02] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Concreto – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. NBR 5738. Rio de Janeiro, 2003.6p
- [03] ABNT. Cimento Portland Composto. - NBR 11578, Rio de Janeiro, 1991.
- [04] ABNT. Cimento Potland de alto-forno. NBR 5735. Rio de Janeiro, 1991.
- [05] OKAMURA, H. Self-Compacting High-Performance Concrete. Concrete International, Vol. 19, No. 7, pp. 50-54, 1997.
- [06] WÜSTHOLZ, T. Fresh Proprieties of self-compacting concrete (SCC). Otto-Graf-Journal. Vol. 14. p 179-188, 2003.
- [07] ABNT. Concreto auto-adensável. NBR15823. Rio de Janeiro, 2010.
- [08] ALENCAR, R.S.A. Dosagem do concreto auto-adensável: produção de pré-fabricados. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo. 179p. São Paulo,2008.
- [09] TUTIKIAN, B. F. Métodos para dosagem de concretos auto-adensáveis. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 148p, 2004.
- [10] MELO, K.A.. Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário. Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis, SC. 180p, 2005.
- [11] ASAGA, K.; ISHIZAKI, M.; TAKAHAGH, S.; KONISHI, K; TSURUMI, T.; DAIMON, M. effect of curing temperature on the hydration of portland cement compounds. in: 9th international conference on computer communication, 1992. Deli. Anais. Deli: ICC, 1992.
- [12] CAMARINI, G. Desempenho de misturas cimento Portland e escória de alto-forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 252 p,1995.
- [13] EL DEBS, M. K. Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações. São Carlos: EESC – USP. 456p, 2000.
- [14] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Accelerated curing of concrete at atmospheric pressure-state of the art. ACI 517.2 R-87, Manual of Concrete, 1992.
- [15] TÜRKEL, S.; ALABAS, V. The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete. Cement and Concrete Research, vol.35, p. 405-411, 2005.

- [16] ABNT. Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. NBR NM 53. Rio de Janeiro, 2003.
- [17] ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN - AMN. NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 6 p.
- [18] TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. Academic Press Ltd. London, 1990.
- [19] SANTOS, L.F. A influência do patamar de cura térmica sobre a resistência dos concretos auto-adensáveis elaborados com diferentes tipos de cimento: avaliação pelo método da maturidade. Dissertação de mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP. 279p, 2010.