

## Evaluation of concrete compression strength of precast beams submitted to steam curing by the Maturity Method

## Avaliação da resistência à compressão do concreto em vigas pré-moldadas submetidas à cura térmica por meio do Método da Maturidade

L. D. P. PERES <sup>a</sup>

eng.lucianoperes@gmail.com

M. P. BARBOSA <sup>b</sup>

mbarbosa@dec.feis.unesp.br

R.C.A PINTO <sup>c</sup>

rpinto@ecv.ufsc.br

### Abstract

The Maturity Method is a non-destructive test used to evaluate concrete properties at early ages according to the material temperature history. This paper presents the application of the Maturity Method concept to estimate compression strength values for precast concrete beams with I cross sections of 50 cm and 70 cm of height submitted to steam curing in a concrete precast factory. The temperature data were collected through thermocouples inserted inside of the concrete, distributed along the length and the height of the structural element. As a consequence of the thermal cycles used in the precast plant, it was noticed that the monitored beams suffered thermal gradients during the steam curing process. It was observed that the Maturity Method was able to evaluate compression strength values at the end of thermal cycles with high accuracy.

**Keywords:** Maturity Method; Steam curing; Activation energy; Precast concrete; Temperature.

### Resumo

O Método da Maturidade é um ensaio não destrutivo utilizado para estimar as propriedades do concreto nas idades iniciais a partir do histórico de temperaturas do material. Este artigo apresenta uma aplicação dos conceitos do Método da Maturidade para estimar valores de resistência à compressão de vigas pré-moldadas com seções transversais em I de 50 cm e 70 cm de altura submetidas a ciclos térmicos realizados junto a uma empresa de pré-moldados. As variações de temperatura tanto ao longo do comprimento quanto ao longo da altura do elemento estrutural foram observadas para os ciclos térmicos durante o dia e durante a noite. Gradientes térmicos foram observados nas vigas durante a realização da cura térmica. O Método da Maturidade permite estimar valores de resistência à compressão ao final do ciclo térmico com precisão elevada.

**Palavras-chave:** Método da Maturidade; Cura térmica; Energia de ativação; Pré-moldados; Temperatura.

<sup>a</sup> Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira, eng.lucianoperes@gmail.com

Av. Brasil Centro, nº 56, CEP: 15385-000, Ilha Solteira – SP, Brasil.

<sup>b</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira, mbarbosa@dec.feis.unesp.br

Alameda Bahia, nº 550, CEP: 15385-000, Ilha Solteira – SP, Brasil.

<sup>c</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC rpinto@ecv.ufsc.br, Cx. Postal 476, CEP: 88040-900, Florianópolis – SC, Brasil.

## 1 Introdução

A evolução do concreto pré-moldado permitiu a elaboração de projetos construtivos ousados, abrangendo uma variedade de formas arquitetônicas, com aplicações na construção de pontes, túneis, usinas hidrelétricas, torres de controle de aeroportos, galpões, etc. Para acelerar o desenvolvimento da resistência à compressão dos elementos estruturais, as fábricas de pré-moldados utilizam cimentos de alta resistência inicial (cimentos ARI), assim como a cura térmica, permitindo que valores elevados de resistências sejam obtidos às idades iniciais.

Esta evolução com o tempo da resistência à compressão do material pode ser avaliada utilizando-se o Método da Maturidade, a partir do histórico de temperaturas do concreto submetido à cura térmica. Diante disso, o presente trabalho, realizado junto a uma fábrica de pré-moldados, teve como objetivo o monitoramento das temperaturas durante o ciclo térmico em elementos pré-moldados de seção transversal I de 50 e 70 cm, para aplicação do Método da Maturidade e estimativa do desenvolvimento da resistência à compressão dos elementos pré-moldados submetidos à cura térmica, nos períodos diurno e noturno.

## 2 Cura térmica

A utilização da cura térmica na indústria de pré-moldados é responsável pela redução do tempo de cura, proporcionando rápida desforma e manuseio, redução da área de estoque, além do aumento da rotatividade das fôrmas. O processo consiste na aplicação de temperaturas de cura

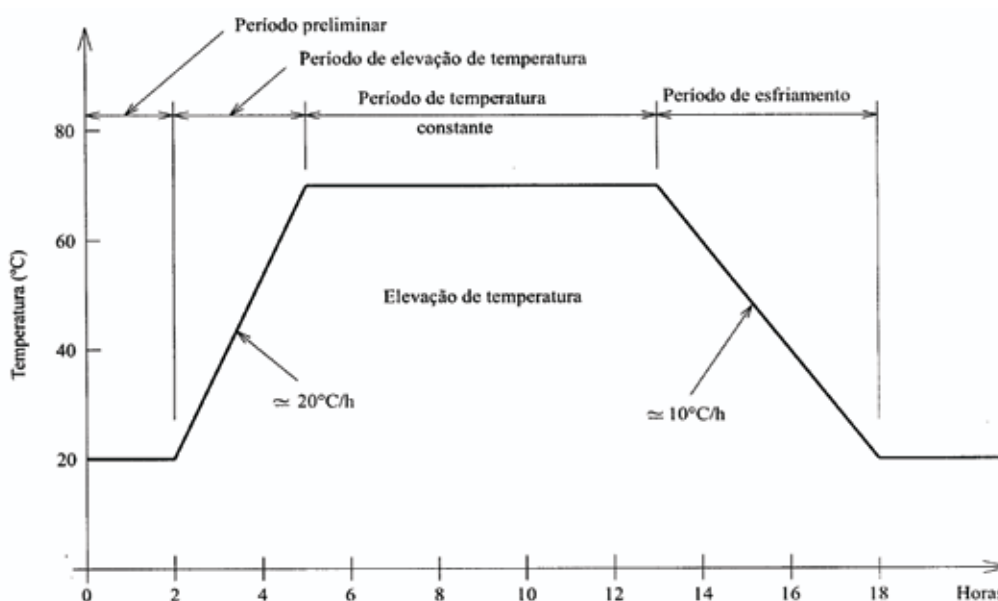
superiores à temperatura ambiente, capazes de acelerar as reações de hidratação do cimento. O ciclo térmico pode ser dividido em quatro períodos, conforme ilustrado pela Figura 1.

O ciclo térmico envolve a etapa de pré-aquecimento (período preliminar), num intervalo de 2 a 5 h, seguida de aquecimento à taxa de 22 °C a 44 °C até atingir a temperatura máxima do ciclo, compreendida entre 50 °C e 82 °C, seguido de esfriamento do material, de modo que o tempo total do ciclo não ultrapasse 18 h (ACI [2]). Durante o estágio inicial das reações de hidratação, a temperatura afeta não somente a taxa de hidratação, mas também as características e posicionamento dos produtos destas reações. Se a velocidade inicial de hidratação for alta não há tempo suficiente para a difusão dos produtos para posições mais distantes das partículas de cimento e para uma precipitação uniforme nos espaços intersticiais, como o que ocorre a temperaturas inferiores (Verbeck e Helmut [3]).

Com relação ao desenvolvimento da resistência, Kanda *et al.* [4] concluíram que aos 7 dias, a resistência obtida é tanto maior quanto maior for a temperatura. No entanto, aos 28 dias, há uma inversão dos valores. A menor temperatura na cura conduz a uma resistência final maior que o concreto curado a temperaturas elevadas, afirmando que a temperatura afeta a resistência última do material.

Na fábrica de pré-moldados onde foi realizada parte do trabalho, a cura térmica foi aplicada até que os corpos-de-prova do concreto apresentassem valores de resistência à compressão da ordem de 21 MPa, respeitando-se as recomendações da empresa para liberação dos elementos estruturais à desforma.

Figura 1 – Ciclo típico de cura a vapor (El Debs (1))



### 3 Método da Maturidade

As origens do Método da Maturidade podem ser traçadas a partir da Inglaterra diante dos processos de cura térmica, com a necessidade de um procedimento para avaliação dos efeitos da temperatura sobre o desenvolvimento da resistência para diferentes condições de cura térmica (McIntosh [5], Nurse [6], Saul [7]).

Nurse [6] sugeriu que o produto de tempo e temperatura fosse capaz de acessar os efeitos da cura térmica sobre a resistência à compressão do concreto. Saul [7] relaciona o conceito de maturidade com a resistência à compressão, dando origem à Lei do Ganho de Resistência com Maturidade, que se transcreve a seguir:

“Uma mesma mistura de concreto a um mesmo índice de maturidade (medido como função de temperatura e tempo) tem aproximadamente a mesma resistência, qualquer que seja a combinação de temperatura e tempo para atingir o índice de maturidade”.

Rastrup [8] introduziu o termo idade equivalente -  $t_e$ , admitindo que o concreto atinja o mesmo índice de maturidade caso fosse mantido a uma temperatura de referência até a idade  $t_e$ .

Freiesleben-Hansen e Pedersen (*apud* Carino [9]), baseados no modelo de Arrhenius (Atkins [10]) para cinética das reações químicas, definiram uma função para expressar o índice de maturidade em termos de idades equivalentes a uma temperatura de referência  $T_r$ , segundo a Equação 1, com a inclusão de um parâmetro relacionado à sensibilidade térmica da mistura, denominado energia aparente de ativação ( $E_a$ ).

$$t_{e(n)} = \sum_{i=1}^n e^{-\left[ \frac{E_a}{R} \left( \left( \frac{1}{T_i} \right) - \left( \frac{1}{T_r} \right) \right) \right]} \cdot \Delta t_i \quad (1)$$

na qual:

$t_{e(n)}$  = idade equivalente à temperatura de referência  $T_r$  (h);

$E_a$  = energia aparente de ativação (J/mol);

$R$  = constante universal dos gases (8,314 J/K mol).

$T_a$  = média da temperatura em um intervalo de tempo  $\Delta t$  (K);

$T_r$  = temperatura de referência (K);

$\Delta t_i$  = intervalo de tempo (h);

#### 3.1 Energia aparente de ativação

Energia de ativação é a energia necessária para que os reagentes atinjam o complexo ativado, necessário ao início da reação química. O termo aparente é utilizado para representar um valor médio dessa energia para as reações que apresentem processos distintos ocorrendo simultaneamente. Freiesleben-Hansen e Pedersen [11] sugerem valores de energia aparente de ativação relacionando-os com a temperatura do concreto ( $T_c$ ), num intervalo de -10 °C a 80 °C:

•  $T_c > 20$  °C:  $E_a(T_c) = 33,50$  kJ/mol

•  $T_c < 20$  °C:  $E_a(T_c) = 33,50 + 1,47(20 - T_c)$  kJ/mol

Carino [9] observou que a maioria dos valores estão compreendidos entre 41 kJ/mol e 67 kJ/mol, variando de acordo com os materiais cimentícios utilizados na mistura, enquanto a ASTM C 1074-98 [12] recomenda, para misturas de cimento Tipo I, valores de energia aparente de ativação entre 40 e 45 kJ/mol, sem adições minerais.

Barbosa *et al.* [13] avaliaram os valores de energia aparente de ativação para alguns cimentos fabricados no Brasil, com obtenção de valores compreendidos entre 20,4 kJ/mol (CP-III-S) e 43,9 kJ/mol (CP-V-ARI), a partir do procedimento ASTM C 1074-98 [12]. Pinto [14] apresenta uma discussão sobre os procedimentos experimentais utilizados para obtenção de  $E_a$ .

### 4 Materiais e programa experimental

O trabalho apresentado nesse artigo foi realizado em duas etapas, a primeira envolvendo ensaios laboratoriais para elaboração da curva de maturidade (curva de calibração) e determinação da energia aparente de ativação ( $E_a$ ). Na segunda etapa foram monitorados os ciclos térmicos na empresa de pré-moldados para aquisição dos valores de temperatura dos elementos estruturais, a partir dos quais foi possível apli-

Tabela 1 – Dosagem do concreto

Materiais	kg/m <sup>3</sup>
Cimento CPV-ARI-Plus	350
Água	177
Areia fina	277
Areia média	643
Brita 16 mm	1093

Tabela 2 – Caracterização físico-química do cimento CP-V-ARI-Plus

Análise Física	Superfície específica (cm <sup>2</sup> /g)	4072
	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.94
	Densidade absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	3.12
	Tempo de início de pega (h)	2.12
Análise Química (%)	Perda ao fogo	3.24
	Insolúveis	0.26
	SiO <sub>2</sub>	18.82
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.86
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.43
	CaO	64.25
	MgO	0.89
	SO <sub>3</sub>	2.75
	Na <sub>2</sub> O	0.11
	K <sub>2</sub> O	0.77
	Equiv. alcalino Na <sub>2</sub> O	0.62
	Cal livre em CaO	1.46

Tabela 3 – Caracterização dos agregados

Propriedades	Areia fina	Areia média	Brita (16 mm)
Diâmetro máximo (mm)	0.595	2.38	19.0
Módulo finura	1.39	2.59	6.51
Massa específica – S.S.D.* (g/cm <sup>3</sup> )	2.641	2.622	2.917
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	2.635	2.611	2.881
Absorção (%)	0.24	0.42	1.23
Pulverulento (%)	0.49	0.05	0.54

\* saturated surface dry

cação do Método da Maturidade para estimativa dos valores de resistência à compressão do concreto.

#### 4.1 Elaboração da curva de maturidade

Para a elaboração da curva de maturidade em laboratório foi utilizada a mesma dosagem do concreto produzido na fábrica de pré-moldados, conforme Tabela 1. As Tabelas 2 e

3 fornecem os resultados dos ensaios de caracterização do cimento e dos agregados, respectivamente. A temperatura média de cura foi de 60 °C, semelhante às condições térmicas utilizadas durante os ciclos realizados na empresa.

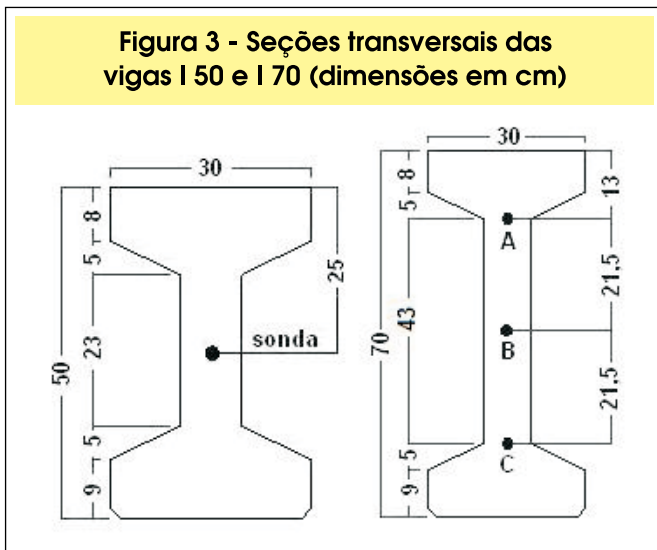
Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm, os quais foram submetidos à cura térmica em aparelho projetado para esse fim, com distribuição homogênea do vapor produzido por uma caldeira disposta junto ao equipamento,

Figura 2 – Equipamento para realização da cura térmica em laboratório



com aquecimento através de resistências elétricas. Em três

Figura 3 - Seções transversais das vigas I 50 e I 70 (dimensões em cm)



corpos-de-prova, localizados na parte inferior, intermediária e superior, respectivamente, foram inseridas sondas termopares acopladas a multímetros digitais para aquisição dos valores de temperatura em intervalos de 5 min durante o ciclo térmico. Os termopares utilizados foram do tipo K (*Cromel/Alumel*), com precisão de leitura térmica da ordem de  $\pm 1,1$  °C. Na Figura 2 está ilustrado o equipamento utilizado para realização da cura térmica em laboratório.

Os corpos-de-prova foram submetidos à cura térmica somente após o período de início de pega do cimento, ou seja, após 2 h da adição de água à mistura. Durante o ciclo térmico, foram realizados ensaios mecânicos para a determinação do desenvolvimento da resistência à compressão em função das idades equivalentes do concreto a uma temperatura de referência de 20 °C, de acordo com a Equação 1, para cada hora do ciclo. O cálculo da energia aparente de ativação ( $E_a$ ) foi realizado segundo o procedimento ASTM C 1074-98 [12], a partir de corpos-de-prova cúbicos de argamassas, com aresta de 5 cm, submetidos a pelo menos três temperaturas de cura distintas. Neste trabalho optou-se pela utilização de 3 ambientes isotérmicos nas temperaturas de 30 °C, 55 °C e 80 °C.

#### 4.2 Monitoramento dos elementos pré-moldados

Na empresa, durante a concretagem dos elementos estruturais, foram inseridos tubos de cobre no concre-

Figura 4 - Pontos de monitoramento térmico para a pista das vigas I 50

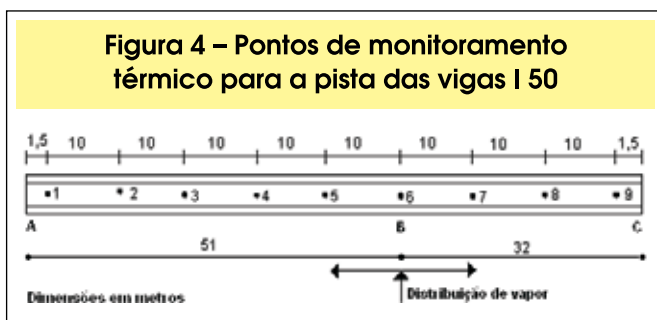
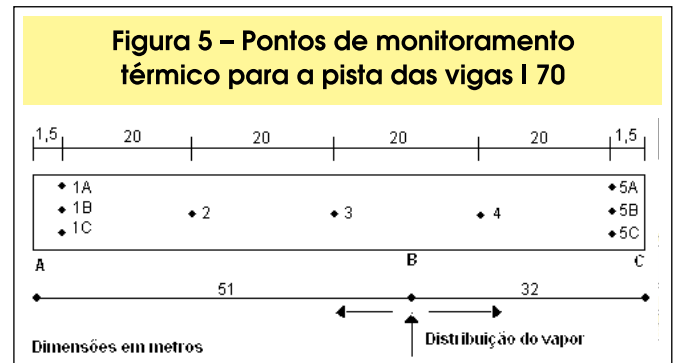


Figura 5 - Pontos de monitoramento térmico para a pista das vigas I 70



to para possibilitar o acesso das sondas termopares às temperaturas internas do material, sendo acopladas a multímetros para aquisição dos valores de temperatura a cada 5 min. As pistas de concretagem eram submetidas à cura térmica com vapor proveniente de uma caldeira abastecida com combustão de madeiras e distribuído na parte inferior dos elementos estruturais. As dimensões das seções das vigas monitoradas estão dispostas na Figura 3.

#### 4.2.1 Pista das vigas em seção transversal I de 50 cm

Para os ensaios de cura térmica com a pista das vigas com seção transversal em I de 50 cm de altura, foi monitorado um ponto por seção, assim como ilustrado pela Figura 3, localizado a uma profundidade de 25 cm. Cada ponto dispôs de um sonda termopar tipo K para aquisição dos valores de temperatura. Ao longo de toda a pista, foram analisadas nove seções, conforme Figura 4. Foram elaborados corpos-de-prova para ensaios mecânicos a cada hora do ciclo, os quais foram dispostos junto à pista

Figura 6 - Disposição dos corpos-de-prova



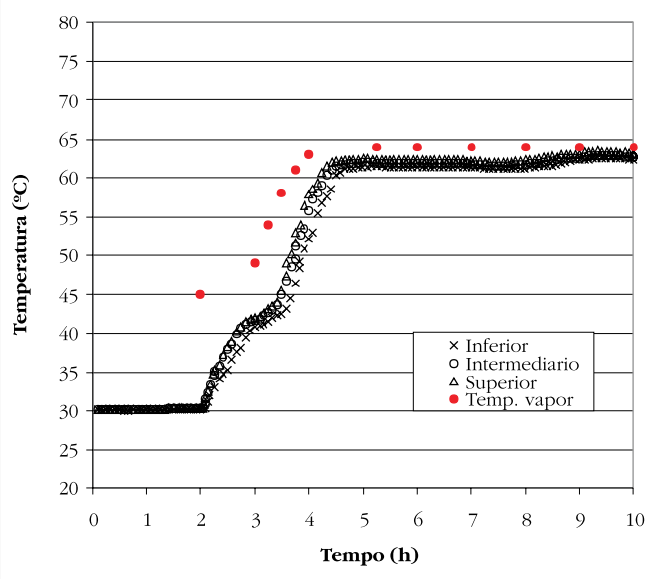
**Figura 7 – Multímetro digital com sonda termopar**



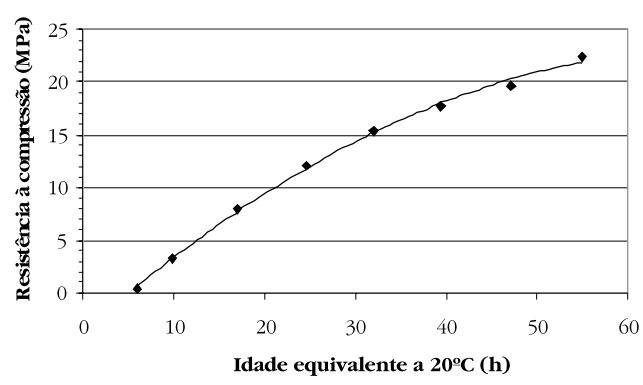
durante o ciclo térmico, nos pontos A, B e C. O tempo decorrido entre a concretagem e o início da aplicação da cura térmica foi de 2 h.

Para a pista de fabricação das vigas com seção transversal em I de 50 cm de altura foram realizados ensaios de cura térmica nos período diurno e noturno, com o objetivo de avaliar a influência da temperatura ambiente sobre os processos de cura, utilizando-se das mesmas dimensões e pontos de monitoramento de temperatura.

**Figura 8 – Gráfico Temperatura x Tempo nos corpos-de-prova**



**Figura 9 – Curva de maturidade obtida em laboratório**



#### 4.2.2 Pista das vigas em seção transversal I de 70 cm

As dimensões da seção das vigas I 70 estão ilustradas pela Figura 3 e os pontos de monitoramento de temperatura estão ilustrados pela Figura 5.

Assim como na pista das vigas I 50, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm e dispostos junto à pista nos pontos A, B e C, com realização de ensaios mecânicos a cada hora do ciclo térmico. O tempo decorrido entre a concretagem do elemento estrutural e o início da cura térmica foi de 3 h.

A Figura 6 ilustra os corpos-de-prova dispostos junto à pista das vigas. A Figura 7 mostra o multímetro digital e uma sonda termopar para aquisição dos valores de temperatura.

## 5 Resultados e discussões

### 5.1 Curva de Maturidade

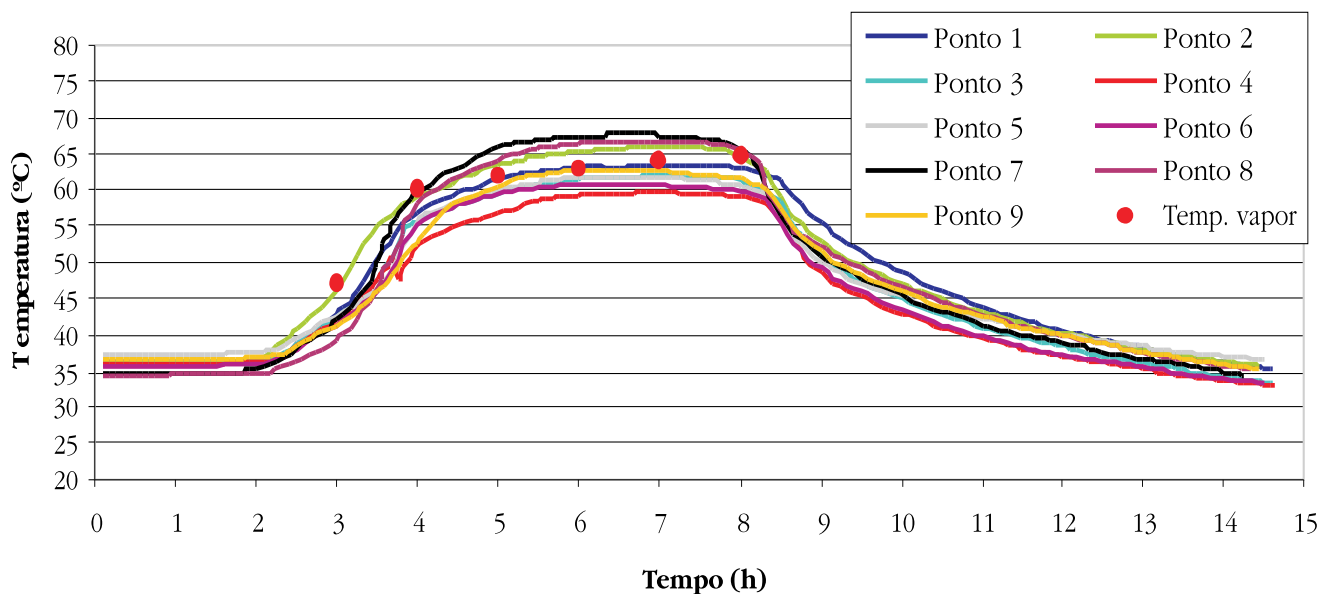
A Figura 8 ilustra o desenvolvimento da temperatura no interior dos corpos-de-prova, durante o ciclo térmico realizado em laboratório, comparando-a com a temperatura do vapor.

A relação entre os valores de resistência à compressão e idades equivalentes a 20 °C dos corpos-de-prova está representada pelo gráfico da Figura 9. Para cálculo das idades equivalentes a 20 °C, segundo a Equação 1, foi utilizado o valor de 39,4 kJ/mol para a energia aparente de ativação ( $E_a$ ), determinado experimentalmente segundo o procedimento ASTM C 1074-98 [12].

### 5.2 Monitoramento da pista de fabricação das vigas I 50 no período diurno

A Figura 10 ilustra a evolução das temperaturas do concreto ao longo da pista de fabricação, assim como a temperatura média do vapor durante o aquecimento. A concretagem do elemento estrutural teve início às 15 h 00 min, com aplicação da cura térmica às 17 h 00 min, com período preliminar de 2 h. A temperatura ambiente no iní-

Figura 10 – Gráfico Temperatura x Tempo para a pista das vigas I 50 (período diurno)



cio da cura térmica foi de 31 °C, com diminuição gradativa até 24 °C ao final do ciclo.

Pela observação da Figura 10, nota-se o aspecto do ciclo térmico com distinção dos períodos de espera (preliminar), aquecimento, temperatura constante e esfriamento. Os gradientes térmicos foram da ordem de 8 °C, com temperaturas compreendidas entre 60 °C e 68 °C.

A Figura 11 fornece a evolução das temperaturas nos corpos-de-prova dispostos ao longo da pista nos pontos A, B e C, conforme indicados anteriormente pela Figura 4. A

maior temperatura para os corpos-de-prova foi de aproximadamente 65°C, posição A, na extremidade esquerda da pista de fabricação das vigas, enquanto a menor, foi de 58°C, correspondente ao ponto B, localizado próximo à saída de vapor. O intervalo de temperaturas dos corpos-de-prova (58 °C a 65 °C) foi semelhante ao intervalo da viga (60 °C a 68 °C).

### 5.3 Monitoramento da pista de fabricação das vigas I 50 (período noturno)

A Figura 12 fornece a evolução da temperatura ao longo da pista das vigas para cura térmica realizada durante o período noturno. A concretagem teve início às 21 h 00 min, com aplicação da cura térmica às 23 h 00 min, com período preliminar de 2 h. A temperatura ambiente variou de 21,8 °C no início da cura até 18,2 °C ao final do ciclo térmico.

Os gradientes térmicos para a viga I 50 com cura térmica durante a noite alcançaram valores de até 10 °C, maiores do que os obtidos com aplicação da cura térmica durante o dia. O comportamento das curvas de temperatura durante o ciclo térmico aplicado durante a noite apresentou-se de forma mais irregular, se comparado com as curvas obtidas durante o processo térmico realizado durante o dia. O ponto 1 (extremidade esquerda da pista) apresentou os maiores valores de temperaturas, enquanto os pontos 8 e 9 (extremidade direita da pista) apresentaram as menores temperaturas durante o ciclo térmico.

A Figura 13 ilustra o comportamento da temperatura nos corpos-de-prova, dispostos nos pontos A, B e C. Nos corpos-de-prova, os valores das temperaturas estiveram compreendidos na faixa de 50 °C a 58 °C (Figura 10), ligeiramente inferiores às temperaturas do concreto na

Figura 11 – Gráfico Temperatura x Tempo para os corpos-de-prova (pista das vigas I 50, diurno)

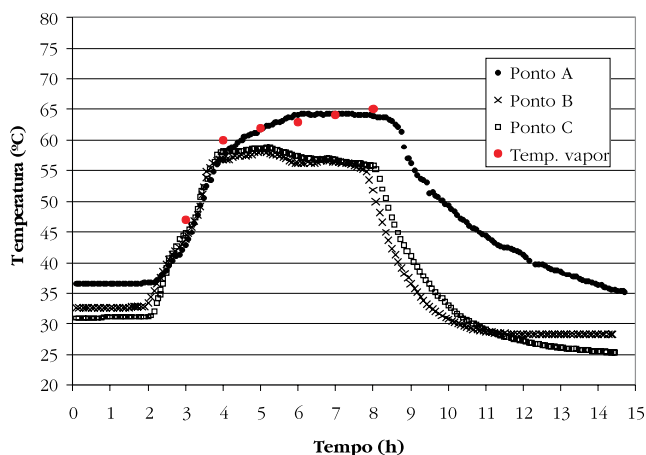


Figura 12 – Gráfico Temperatura x Tempo para a pista das vigas I 50 (período noturno)

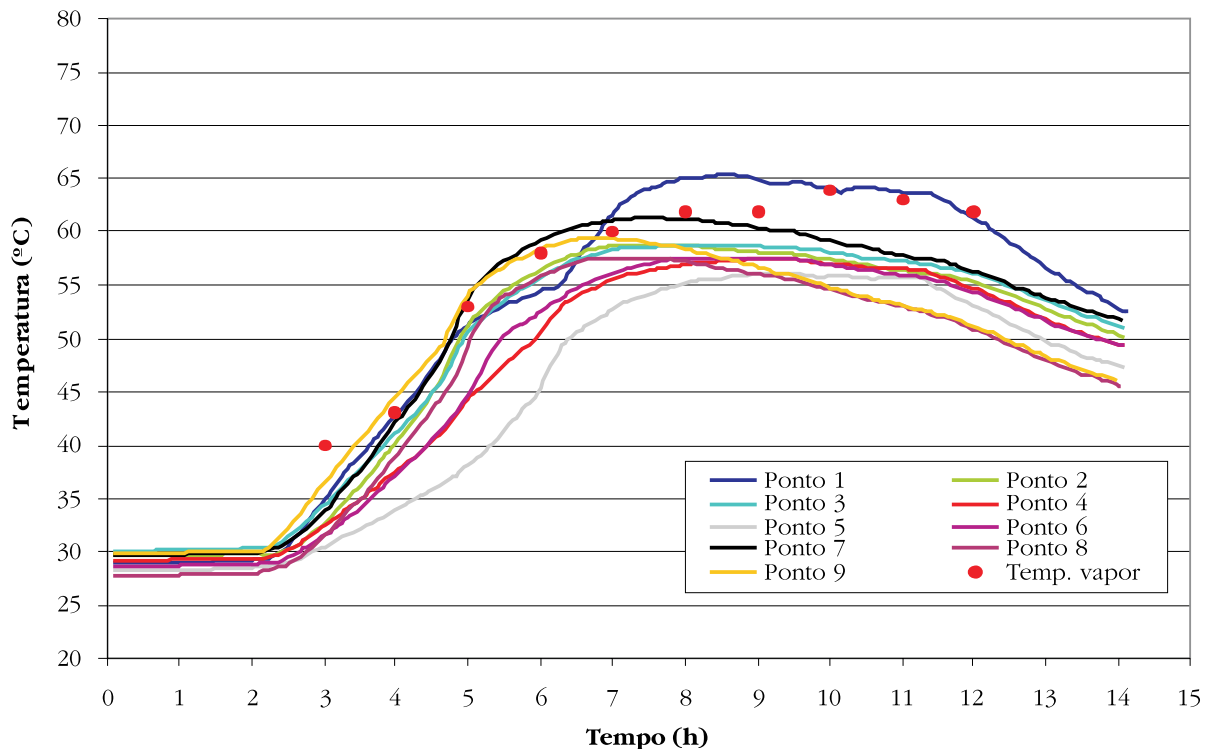


Figura 13 – Gráfico Temperatura x Tempo para os corpos-de-prova (VI 50, noturno)

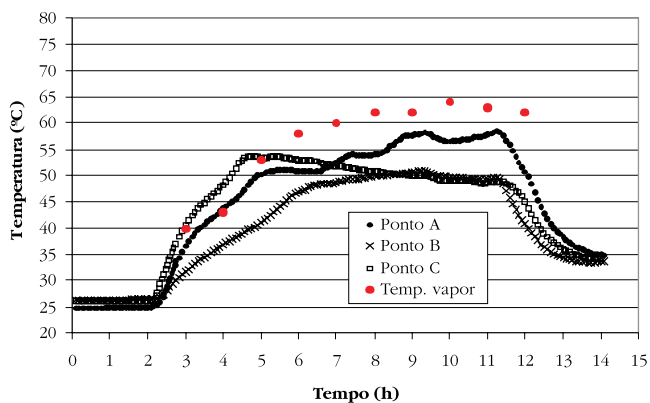
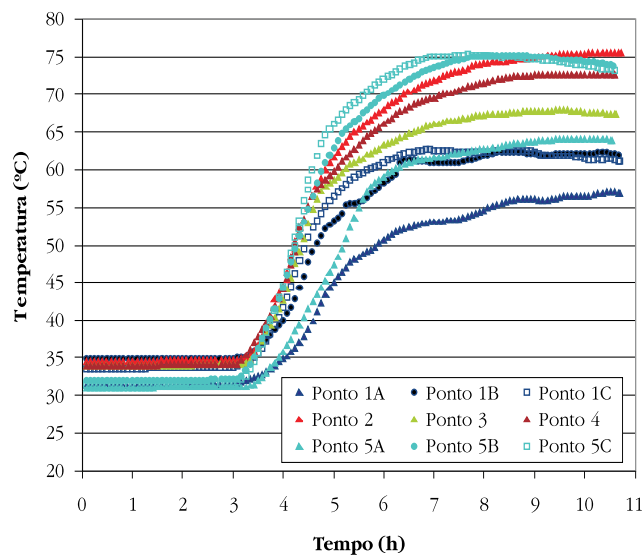
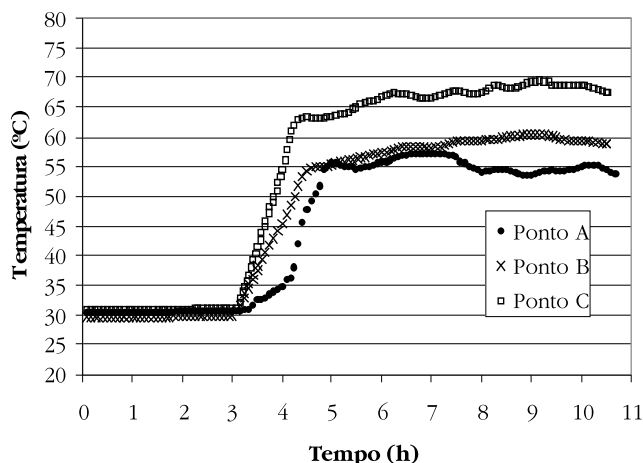


Figura 14 – Gráfico Temperatura x Tempo para a pista das vigas I 70





**Figura 15 – Gráfico Temperatura x Tempo nos corpos-de-prova da pista das vigas I 70**



pista (55 °C a 65 °C). Os maiores valores de temperatura foram observados junto aos corpos-de-prova localizados nas extremidades da pista (pontos A e C).

#### 5.4 Monitoramento da pista de fabricação das vigas I 70

A concretagem da viga em seção I de 70 cm de altura foi realizada às 15 h 30 min, com início de aplicação de cura térmica a partir das 18 h 30 min, com período preliminar igual a 3 h. A temperatura ambiente média foi de 24 °C. Para que os corpos-de-prova obtivessem 21 MPa foram necessárias 10 h de ciclo térmico. Na Figura 14 estão ilustradas as curvas de temperatura para cada ponto analisado durante a realização da cura térmica.

Conforme a Figura 14, os pontos inferiores das seções apresentaram maiores temperaturas devido à sua proximidade com a saída de vapor. Diferenças de temperatura foram observadas ao longo da pista, sendo que a seção 1 (pontos 1A, 1B e 1C), localizada na extremidade esquer-

**Tabela 4 – Comparação entre os valores reais e teóricos de resistência dos corpos-de-prova**

	Idade (h)	Ponto A				Ponto B				Ponto C			
		t <sub>e</sub> (h)	f <sub>c</sub> Real (MPa)	f <sub>c</sub> C.Mat. (MPa)	(%)	t <sub>e</sub> (h)	f <sub>c</sub> Real (MPa)	f <sub>c</sub> C.Mat. (MPa)	Erro (%)	t <sub>e</sub> (h)	f <sub>c</sub> Real (MPa)	f <sub>c</sub> C.Mat. (MPa)	Erro (%)
Pista vigas I 50 (dia)	3	7.4	0	1.7	-	6.7	0	1.1	-	6.3	0	0.9	-
	4	12.2	4.8	4.8	0.2	11.7	2.0	4.4	117.7	11.4	3.8	4.3	12.3
	5	19.2	8.2	9.0	9.4	17.9	6.8	8.2	21.9	17.9	8.2	8.2	-
	6	27.2	12.0	13.1	8.6	24.1	10.8	11.6	7.3	24.3	12.6	11.7	7.0
	7	35.5	16.7	16.6	0.5	30.0	14.8	14.4	2.8	30.4	16.6	14.5	12.3
	8	43.8	19.1	19.4	1.4	35.7	17.1	16.7	2.2	36.3	19.4	16.9	12.7
	9	51.3	20.5	21.2	3.4	38.9	19.4	17.8	7.9	40.4	20.1	18.3	8.7
	10	56.2	21.7	22.1	1.9	40.9	20.6	18.5	10.4	42.7	21.2	19.0	9.9
Pista vigas I 50 (noite)	3	4.3	0	0	-	4.4	0	0	-	4.8	0	0	-
	4	7.3	0	1.5	-	6.6	0	1.0	-	8.4	0	2.3	-
	5	11.2	2.4	4.2	72.7	9.3	1.0	2.9	182.4	13.4	3.5	5.5	56.7
	6	15.9	7.1	7.1	0.7	12.7	3.6	5.1	43.4	18.6	7.6	8.6	13.6
	7	20.7	9.1	9.8	8.1	16.8	6.9	7.6	11.1	23.6	11.2	11.3	1.2
	8	26.0	12.1	12.5	3.3	21.2	9.9	10.1	1.9	28.3	14.5	13.6	5.8
	9	31.9	16.3	15.2	7.1	25.7	12.5	12.4	0.8	32.9	16.1	15.6	2.9
	10	38.1	17.8	17.6	1.6	30.3	15.8	14.5	8.3	37.3	17.6	17.3	1.7
Pista vigas I 70	4	7.2	0	1.5	-	7.7	0	1.8	-	8.6	0	2.5	-
	5	11.2	2.3	4.2	83.0	12.8	4.3	5.2	20.1	16.3	5.6	7.3	30.5
	6	16.9	7.9	7.7	2.9	18.8	9.4	8.8	7.2	25.0	12.0	12.0	0.3
	7	23.0	11.5	11.0	4.1	25.2	13.8	12.1	11.8	34.3	16.8	16.1	4.0
	8	28.8	14.3	13.8	3.5	31.9	15.8	15.2	3.9	43.8	19.3	19.4	0.3
	9	34.2	17.1	16.1	5.6	38.9	19.6	17.8	9.2	53.7	20.9	21.7	3.7
10	39.7	20.4	18.1	11.5	45.8	20.5	19.9	2.9	63.9	24.0	22.9	4.3	

da, apresentou as menores temperaturas se comparadas com a seção 5 (pontos 5A, 5B e 5C), localizada na extremidade direita da pista. Os maiores gradientes térmicos observados foram da ordem de 20°C, com temperaturas compreendidas entre 57°C e 76°C, correspondentes às temperaturas nos pontos 1A e 2, respectivamente.

Na Figura 15 estão representadas as curvas de evolução das temperaturas dos corpos-de-prova, localizados nas posições A, B e C, conforme esquema ilustrado pela Figura 5. Para a pista das vigas I 70, o ponto C apresentou as maiores temperaturas, com temperatura máxima da ordem de 70 °C.

### 5.5 Aplicação do Método da Maturidade

Os valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova obtidos durante a realização dos ciclos térmicos na empresa estão dispostos na Tabela 4, assim como os valores teóricos de resistência à compressão obtidos através da curva de maturidade elaborada em laboratório, relacionando os valores de resistência com o desenvolvimento das idades equivalentes a uma temperatura de referência de 20 °C, através da curva apresentada na Figura 9.

Para a pista das vigas I 50 com cura térmica aplicada durante o dia foram necessárias 10 h de ciclo térmico para que os corpos-de-prova apresentassem resistências da ordem de 21 MPa, enquanto que para o ciclo realizado no período noturno foram necessárias 14 h, evidenciando a influência da temperatura ambiente sobre os períodos de realização dos ciclos térmicos.

A aplicação do Método da Maturidade foi capaz de fornecer valores estimados de resistência à compressão dos corpos-de-prova ao final dos ciclos térmicos com margens de erro compreendidas entre 1,1% e 11,5%. No entanto, para as idades iniciais, as margens de erro foram maiores, o que pode ser explicado pela ordem de grandeza das variações de resistência se comparada com os valores reais de resistência dos corpos-de-prova obtidos *in loco*.

A ocorrência de gradientes térmicos ao longo das pistas de fabricação das vigas foi responsável pelo aparecimento de regiões com diferenças no desenvolvimento das resistências à compressão, nas quais as regiões mais aquecidas apresentaram maiores valores de resistência se comparadas com as regiões menos aquecidas.

Diante dos resultados expostos, questiona-se a confiabilidade da estimativa de resistência por corpos-de-prova dispostos no início, meio e final da pista de fabricação das vigas. A diferença de temperatura observada entre as vigas e os corpos-de-prova e os gradientes térmicos encontrados nas vigas fazem com que os valores de resistência à compressão a partir desses corpos-de-prova possam não representar fielmente a resistência do elemento estrutural durante o processo de cura térmica, devido as diferenças de forma entre os corpos-de-prova e as vigas pré-moldadas, que podem influenciar relevantemente a taxa de transferência de calor entre o vapor e o material. Adicionalmente, os gradientes térmicos que surgem ao longo da pista de concretagem e na altura do elemento estrutural dificilmente podem ser representados utilizando-se corpos-de-prova.

A utilização do Método da Maturidade, entretanto, é capaz de estimar valores de resistência à compressão do concreto a partir do histórico das temperaturas, nos pontos sujeitos às maiores solicitações ou deformações, representando com melhor precisão o comportamento mecânico do material quando exposto a altas temperaturas.

Pela observação da Tabela 4, o Método da Maturidade foi capaz de estimar valores de resistência à compressão para a última hora do ciclo com margens de erros compreendidas entre 1,9% e 10,4% (pista das vigas I 50, diurno); 1,1% e 9,2% (pista das vigas I 50, noturno) e 2,9% e 11,5% (pista das vigas I 70).

## 6 Conclusões

- Para os elementos estruturais analisados, a aplicação de cura térmica foi responsável pelo aparecimento de gradientes de temperatura tanto ao longo do comprimento quanto na altura da seção das pistas de fabricação.
- Diferenças térmicas durante os processos de cura resultaram em gradientes de resistência na estrutura, com valores maiores de resistência nas regiões mais aquecidas da estrutura (extremidade das pistas).
- A temperatura ambiente influenciou os processos de cura térmica. Considerando-se a mesma resistência para liberação à desforma, observou-se que em dias quentes os ciclos térmicos são mais curtos (mais eficientes) se comparados com dias frios, sendo que houve uma maior perda de calor para o ambiente, retardando o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto.
- Na cura térmica, a distribuição do vapor deve ser realizada de modo a minimizar diferenças térmicas tanto ao longo do comprimento quanto na altura do elemento estrutural, evitando o aparecimento de gradientes térmicos em pontos distintos da peça. Como consequência destes gradientes térmicos, aparecerão regiões com resistência à compressão distintas.
- Às idades finais dos ciclos térmicos, a utilização do Método da Maturidade forneceu valores teóricos de resistência à compressão para os corpos-de-prova com margens de erro compreendidas entre 1,1% e 11,5%, validando-se como alternativa para ensaio não destrutivo do concreto.
- A partir da elaboração e calibração de uma curva de Maturidade, a utilização do método permite estimar valores de resistência à compressão de elementos estruturais, tornando-se vantajosa nos locais onde seja inviável a extração de testemunhos e/ou não se disponha de instrumentos necessários à realização dos ensaios mecânicos.

## 7 Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento da pesquisa;

À Protendit Pré-Moldados, de São José do Rio Preto – SP; Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), em Ilha Solteira – SP; e À Holcim, pelo fornecimento do cimento utilizado no trabalho.

## **8 Referências bibliográficas**

- 01] EL DEBS, M. K. Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações. São Carlos: EESC – USP, 2000. 456p.
- [02] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 517.2 R-87: Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure-State of the Art. ACI Manual of Concrete, 1992.
- [03] VERBECK, G. J.; HELMUTH, R. H. Structure and physical properties of cement paste. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5, 1968, Tokyo. Proceedings... Tokyo, 1968. p. 1-32.
- [04] KANDA, T., SAKURAMOTO, F., SUZUKI, K. Compressive strength of silica fume concrete at higher temperatures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS, 4, 1992, Istambul. Proceedings... Istambul: American Concrete Institute, 1992.
- [05] McINTOSH, J. D., Electrical Curing of Concrete. Magazine of Concrete Research, vol.1, p. 21-28, 1949.
- [06] NURSE, R. W. Steam Curing of Concrete. Magazine of Concrete Research, vol.1, nº 2, p.79-88, 1949.
- [07] SAUL, A. G. A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. Magazine of Concrete Research, vol. 2, nº 6, p. 127-140, 1951.
- [08] RASTRUP, E. Heat hydration in concrete. Magazine of Concrete Research, vol.6, nº 17, p. 79-92, 1954.
- [09] CARINO, N.J. The Maturity Method - CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. [S.l]: CRC Press, 1991. p. 101-146.
- [10] ATKINS, P.W. Physical Chemistry. 5ª edição. Melbourne: Oxford University Press, 1994. 877 p.
- [11] FREIESLEBEN-HANSEN, P.; PEDERSEN, E.J. Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete. Nordisk Betong, vol.1, p. 21-25, 1977.
- [12] AMERICAN STANDARD TESTING METHODS. ASTM C 1074: Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. Filadélfia, 1998.
- [13] BARBOSA, M. P.; PINTO, R. C. A.; PERES, L. D. P. The Influence of Silica Fume on the Apparent Activation Energy of HPC Mixtures with various types of Brazilian cement. American Concrete Institute Special Publication, Farmington Hills - EUA, v. 229, p. 423-434, 2005.
- [14] Pinto, R. C. A., Determinação da Energia Aparente de Ativação da Hidratação do Cimento, e-mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol. 1 nº 2, pp. 95-104, 2004.