



# Pesquisa do Tempo de Trabalhabilidade de Concreto Auto-Adensável através de Ensaios em Pastas

Carlos Calado<sup>1, a</sup>, Aires Camões<sup>2, b</sup>, Said Jalali<sup>2, c</sup>, Béda Barkokébas Jr<sup>1, d</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Pernambuco, Brasil

<sup>2</sup> CTAC, Universidade do Minho, Portugal

<sup>a</sup>carlos.calado@upe.br, <sup>b</sup>aires@civil.uminho.pt, <sup>c</sup>said@civil.uminho.pt, <sup>d</sup>beda.jr@upe.br

**Palavras-chave:** concreto auto-adensável; concreto convencional; ensaios em pastas; trabalhabilidade.

## Resumo.

A pesquisa buscou demonstrar a possibilidade de estabelecimento do tempo disponível de trabalhabilidade do CAA fresco através de ensaios aplicados nas suas pastas, utilizando-se aparato simples desenvolvido para a medição da resistividade elétrica em laboratório de canteiro de obras, relacionando-a com o tempo de início e fim de pega obtido através de agulha de Vicat. Ainda, buscou verificar a evolução da temperatura da pasta através da calorimetria e da sua fluidez no cone Marsh. Dessa forma, foi possível observar a evolução do comportamento da pasta ao longo do tempo através dos resultados obtidos nos ensaios, e conhecer o tempo disponível de trabalhabilidade do CAA para realização das etapas de concretagem da estrutura. Para a temperatura ambiente de 32°C, o tempo decorrido para mudança no comportamento da resistividade ( $t_i$ ) variou de 234 minutos para pasta com cimento e água (C+A) para 471 minutos quando se acrescentou superplastificante e plastificante (C+A+SP+P). Para Vicat, o tempo de início de pega foi de 103 minutos para (C+A), até 330 minutos para (C+A+SP+P). Para Calorimetria, o pico de temperatura foi de 360 minutos para (C+A), até 860 minutos para (C+A+SP+P). Quanto a fluidez, o tempo de escoamento ficou entre 90 e 120 minutos para (C+A+SP+P) e (C+A+SP). Assim, foi possível relacionar os resultados de Vicat com resistividade elétrica, e também verificar que a perda de fluidez limitou o tempo de autoadensabilidade, possivelmente pela redução de desempenho do superplastificante. Ainda, restou demonstrada a viabilidade do uso do aparato para medição do tempo de pega em pastas com aditivos químicos.

## 1. Introdução

Segundo Soroka (2004), a pasta de cimento é o produto da mistura de cimento e água que se apresenta plástica e com trabalhabilidade, onde suas propriedades permanecem inalteradas durante algum tempo, conhecido por período de dormência e, ao final dele, sua consistência altera a tal grau que perde a plasticidade e torna-se quebradiça e não trabalhável, atingindo o tempo inicial de pega. O final da pega ocorre quando a pasta torna-se um sólido rígido, quando se inicia o seu endurecimento. Usualmente é especificado nas Normas para cimento Portland um mínimo de 45 minutos para tempo de início de pega e 375 minutos para tempo final de pega, a exemplo da ASTM C150 (2015). Soroka (2014) coloca que a trabalhabilidade é essencialmente determinada pela consistência e coesividade do concreto fresco, sendo controlada através do ensaio de espalhamento (*slump flow*) para o CAA, onde, segundo o ACI 116R-90 (1990), consistência é a mobilidade relativa ou capacidade do concreto apresentar fluidez. De Schutter (2012) considerando ser o cimento um ligante hidráulico onde as reações químicas levam ao endurecimento, coloca

que, no processo de hidratação, ocorre reação exotérmica com desenvolvimento de calor que provoca aumento da temperatura do concreto. Segundo Camões (2003), entende-se o concreto como um material composto por matriz aglomerante, pasta ou argamassa, envolvendo material de enchimento, esqueleto granular, onde, após endurecer, forma massa sólida mais ou menos compacta, similar a uma pedra natural. Assim, analisar o comportamento das pastas e argamassas permite uso de menor quantidade de constituintes, menor tempo na preparação das amostras e redução nos custos com recursos humanos para realização dos ensaios.

Segundo Neville (1997), na prática início e fim de pega são termos escolhidos e usados para descrever arbitrariamente o processo de passagem do concreto do estágio fluido para o estágio rígido. Também constatou que, no momento da pega, há uma acentuada redução na condutividade elétrica da pasta de cimento, o que permite estabelecer medição de tempo de pega a partir de ensaios de medição da condutividade elétrica. Assim, o acontecimento da pega do cimento abrange o avanço das propriedades mecânicas da pasta no processo de endurecimento, propriedades essencialmente físicas, associado a um processo químico de hidratação, sendo, portanto, um fenômeno artificialmente definido como o momento em que a pasta adquire certa consistência que inviabiliza a sua trabalhabilidade.

Zongjin *et al.* (2007) realizaram estudo para determinação do tempo de pega do concreto através de medição de resistividade elétrica usando dispositivo não penetrante, patenteado, com obtenção das medições dos pontos críticos das curvas de resistividade elétrica obtidas e correlacionando com os tempos inicial e final de pega obtidos através da resistência à penetração, agulha de Vicat. A Figura 1 mostra o fluxograma da determinação da relação entre as respostas por resistividade e Vicat.

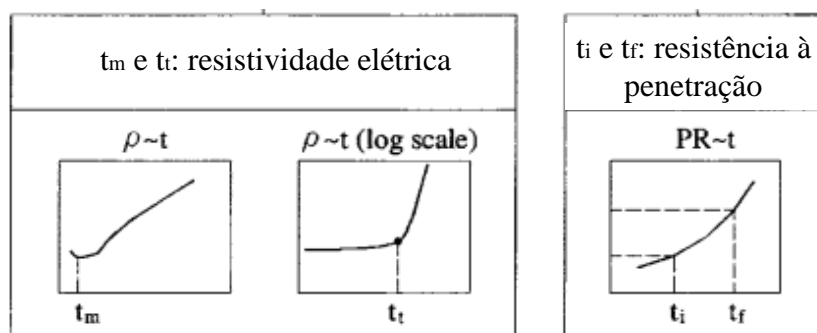


Figura 1: Determinação entre a relação das respostas de resistividade e tempo de pega (Zongjin *et al.*, 2007)

Baseados nos seus estudos, Zongjin *et al.* (2007) propuseram as seguintes equações de correlação para estabelecimento de  $t_i$  e  $t_f$ :

$$t_i = 1,8807t_m + 0,4429t_t \quad (\text{equação 1})$$

Onde  $t_i$  = tempo inicial de pega (h);  $t_m$  = tempo de ocorrência do ponto mínimo (h) e  $t_t$  = tempo de ocorrência do ponto de transição (h), sendo obtidos do gráfico de evolução da resistividade da pasta ao longo do tempo de ensaio.

$$t_f = 0,9202t_t + 0,2129 \quad (\text{equação 2})$$

Onde  $t_f$  = tempo final de pega (h).

Para medição do tempo  $t_t$ , a presente pesquisa desenvolveu metodologia própria de estabelecer por regressão linear duas retas, uma para cada trecho do gráfico de evolução da resistividade elétrica medida ao longo de ensaio, desde o início da mistura dos constituintes. O tempo  $t_t$  foi assumido como sendo o correspondente à interseção das duas

retas. O tempo  $t_m$  foi assumido igual a 30 min (0,5 h), considerando-se a pesquisa de Zongjin *et al.* (2007).

Para medição da evolução da resistividade elétrica da pasta, foi proposto um aparato simples e original desenvolvido para a pesquisa, conforme diagrama elétrico esquemático apresentado na Figura 2.

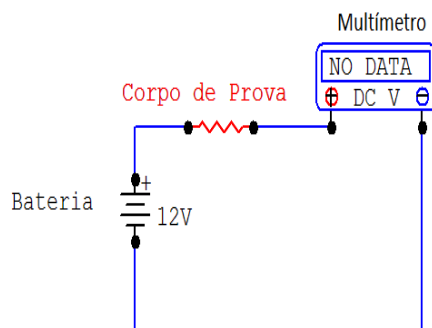


Figura 2: Diagrama elétrico esquemático para medição de resistividade em pasta

No ensaio de resistividade elétrica, a resistência elétrico-volumétrica de cada corpo-de-prova foi obtida por meio da Equação 3, conforme Seção 8.1 da NBR 9204 (2012):

$$R_v = \frac{U}{I} \quad (\text{Equação 3})$$

- $R_v$  = resistência elétrico-volumétrica do corpo-de-prova em quilo-ohm ( $k\Omega$ );  $U$  = tensão aplicada ao corpo-de-prova em volt (V);  $I$  = intensidade da corrente elétrica através do corpo-de-prova em miliampère (mA).

Calculou-se a resistividade elétrico-volumétrica de cada corpo-de-prova utilizando-se a seguinte Equação 4, conforme Seção 8.2 da NBR 9204 (2012):

$$\rho_v = R_v \frac{A}{h} \quad (\text{Equação 4})$$

- $\rho_v$  = resistividade elétrico-volumétrica do corpo-de-prova na idade de ensaio, em quilo-ohm - centímetros ( $k\Omega\text{-cm}$ );  $R_v$  = resistividade elétrica - volumétrica do corpo-de-prova, em quilo-ohm ( $k\Omega$ );  $A$  = área do eletrodo principal ou blindado, em centímetros quadrados ( $\text{cm}^2$ ).

A pesquisa desenvolvida buscou demonstrar a possibilidade de estabelecimento do tempo disponível de trabalhabilidade do CAA fresco, a partir do início da mistura dos constituintes, em escala evolutiva do tempo, com a determinação dos tempos de início e fim de pega através de ensaios de penetração, agulha de Vicat, e ensaios não penetrantes, resistividade elétrica em pastas, verificando o tempo decorrido até o pico de temperatura da pasta obtido por calorimetria e também o comportamento da fluidez ao longo do tempo de ensaio através do cone Marsh (Labrincha *et al.*, 2007; Desmet *et al.*, 2011).

Para aplicação dos ensaios descritos, buscou-se estudar o comportamento de cinco tipos representativos de composições de pastas, conforme estabelecidas a seguir: cimento + água (pasta 1); cimento + água + superplastificante + plastificante (pasta 2); cimento + água + superplastificante (pasta 3); cimento + água + plastificante (pasta 4) e cimento + metacaulim + água + superplastificante + plastificante (pasta 5). Todos os ensaios foram aplicados com as pastas na temperatura ambiente de 32°C.

Com os resultados dos ensaios aplicados nas cinco pastas estabelecidas, espera-se poder entender melhor a evolução do comportamento do CAA na manutenção do tempo

disponível de autoadensabilidade para a realização das etapas de concretagem da estrutura, do início da mistura até a conclusão do adensamento e acabamento nas formas.

## 2. Estudos desenvolvidos

A escolha das pastas 1 (C+A), 2 (C+A+SP+P), 3 (C+A+SP) e 4 (C+A+P) procurou entender as diferenças de comportamento entre as pastas contendo aditivo químico superplastificante associado a plastificante (pasta 2), daquelas contendo apenas superplastificante (pasta 3) e plastificante (pasta 4). A pasta de referência adotada continha apenas cimento e água (pasta 1). A pasta 5 (C+MK+A+SP+P) contém metacaulim com relação cimento/finos igual a 0,92 e relação água/ligante igual a 0,451. As pastas 1 a 4 tiveram a mesma relação água/cimento igual a 0,30. Os constituintes foram os mesmos em todas as pastas, com larga aplicação na Região do Recife, local de desenvolvimento da pesquisa. A Tabela 1 a seguir apresenta a composição das pastas 1 a 5.

Tabela 1: Composições das pastas 1 a 5.

	Un.	Pasta 1	Pasta 2	Pasta 3	Pasta 4	Pasta 5
Cimento CP-V ARI	g	500	500	500	500	459,8
Metacaulim	g	-	-	-	-	40,2
Água	g	150	150	150	150	225,3
Superplastificante	g	-	5,5	5,5	-	5,7
Plastificante	g	-	4,6	-	4,6	4,6
Relação (a/l) <sup>(1)</sup>	-	0,30	0,30	0,30	0,30	0,451
Relação (c/f) <sup>(2)</sup>	-	1	1	1	1	0,92

<sup>(1)</sup> Relação água/ligante (ligante: cimento + metacaulim)

<sup>(2)</sup> Relação cimento/fino (ligante: cimento + metacaulim)

A Tabela 2 apresenta as pastas que foram aplicadas nos ensaios de agulha de Vicat, resistividade elétrica, calorimetria e cone Marsh. Todos os ensaios foram realizados com as pastas na temperatura ambiente de 32°C.

Tabela 2: Resumo ensaios, composições e temperatura.

Ensaio	Composição	Temperatura
Agulha de Vicat	Pastas 1 a 5	32°C
Resistividade elétrica	Pastas 1 a 5	
Calorimetria	Pastas 1 a 4	
Cone Marsh	Pastas 2, 3 e 5	

A Figura 3 apresenta molde tronco cônico padrão utilizado na execução do ensaio de agulha de Vicat. A Figura 4 mostra o aparato montado para a medição da resistividade elétrica nas pastas, constando de: (i) bateria de 12 volts para aplicar diferença de potencial nas pastas; (ii) multímetro digital utilizado para medição das leituras de corrente; (iii) cabos para fazer a conectividade entre as pastas, bateria e multímetro; molde de corpo de prova de PVC – CAPS – com 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento onde, internamente nas extremidades, chapas metálicas de aço inoxidável foram conectadas a barras de metal externas para assegurar a condução da corrente elétrica. O CAPS possuía furo para verificar o total preenchimento do molde pelas pastas e também para colocação de termômetro para medição e acompanhamento da temperatura das pastas. A Figura 5 visualiza o procedimento concluído para realização do ensaio de calorimetria, com os

sensores térmicos fixados para início das leituras. A Figura 6 mostra a realização do ensaio com cone Marsh.



Figura 3: Ensaio de agulha de Vicat



Figura 4: Ensaio de resistividade elétrica



Figura 5: Ensaio de calorimetria



Figura 6: Ensaio de cone Marsh

Os ensaios foram realizados na temperatura ambiente e procuraram manter a temperatura de todas as pastas em 32°C ao longo do tempo de realização do ensaio. Dessa forma, alguns procedimentos foram adotados conforme descrito a seguir. Inicialmente os materiais foram acondicionados em uma sala climatizada à temperatura de 18°C. Aproximadamente duas horas depois eles possuíam temperatura média de 30°C, quando era dado início a mistura dos constituintes na seguinte seqüência: mistura do cimento com a água durante o período de dois minutos; adição do superplastificante e/ou plastificante mantendo-se o processo de mistura por mais dois minutos; manutenção do controle da temperatura da pasta através de termômetros digitais durante todo o tempo dos ensaios, obtendo-se a média buscada entre 32°C e 32,5°C.

Para a realização dos ensaios de calorimetria, foram utilizados os seguintes equipamentos: caixa térmica de EPS (isopor) com espessura de 4 centímetros de parede; termômetro com datalog com 4 canais para sensores do tipo *k*; argamassadeira; película laminada para forração da parte interna da caixa com objetivo de melhorar as condições de manutenção da temperatura interna.

Para aplicação do cone Marsh foi providenciado o volume mínimo de pasta de 3.000 cm<sup>3</sup> de volume para procedimento dos ensaios. Foram utilizados os seguintes equipamentos: cone Marsh; misturador; balança; proveta; bandejas; caldeirões; termômetros; peneira 2,36 mm; haste e cronômetro.

Após a preparação da pasta era realizada a primeira leitura e as demais leituras eram realizadas a cada intervalo de 15 minutos até a conclusão do ensaio.

### 3. Resultados e discussões

#### 3.1. Agulha de Vicat

A Tabela 3 apresenta os resultados de tempo de início de pega  $T_i(V)$  e tempo de fim de pega  $T_f(V)$  dos ensaios de agulha de Vicat aplicados às pastas 1 a 5.

Tabela 3: resultados dos ensaios de agulha de Vicat

	Unid.	Pasta 1	Pasta 2	Pasta 3	Pasta 4	Pasta 5
$T_i(V)$	min	1,71	5,50	5,83	7,00	5,54
$T_f(V)$	min	2,58	8,00	7,92	7,83	8,07

A Figura 7 apresenta os gráficos dos resultados indicados na Tabela 3.

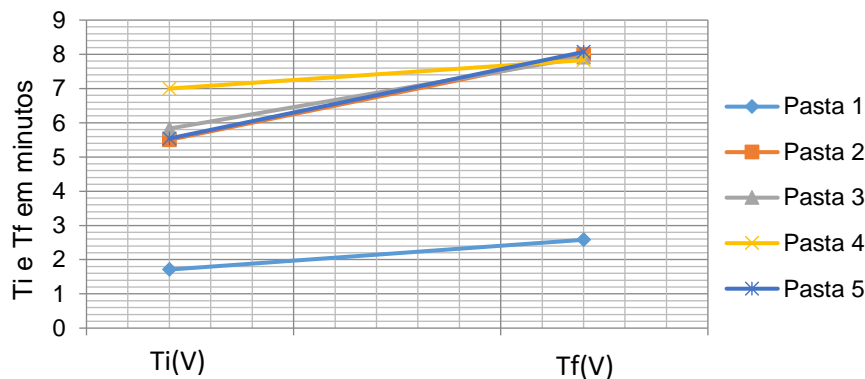


Figura 7: Tempos de início e fim de pega para as pastas 1 a 5

Os resultados demonstraram que a aplicação de aditivos químicos nas pastas 2 a 5, provocaram acentuado acréscimo nos tempos de início e fim de pega em relação à pasta 1 de referência. Observou-se também diferenças pouco representativas nos tempos obtidos entre as pastas 2 a 5, ao fazer comparativo com a pasta 1.

#### 3.2. Resistividade elétrica

As Figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, os gráficos das pastas 1 e 2, ao se aplicar a metodologia proposta pelo presente estudo de estabelecimento de duas retas por regressão linear para determinação do tempo  $t_i$  correspondente à interseção das mesmas.

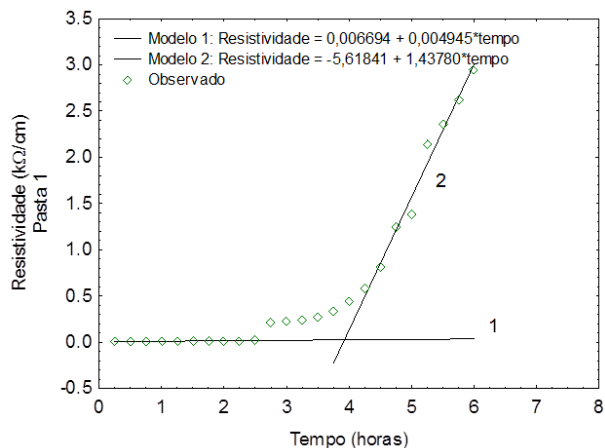


Figura 8: Interseção das retas 1 e 2 para a pasta 1 com  $t_i = 3,90$  horas

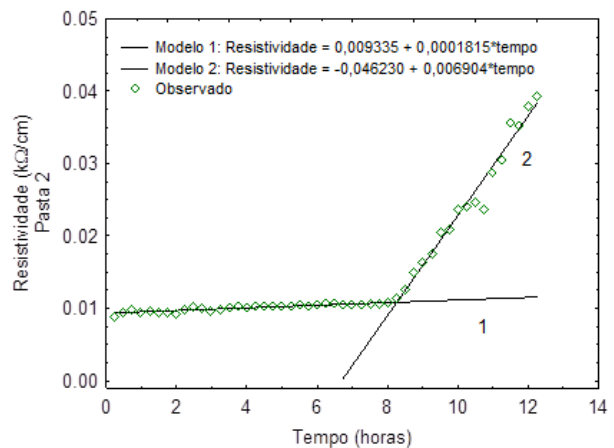


Figura 9: Interseção das retas 1 e 2 para a pasta 2 com  $t_i = 7,84$  horas

Os valores obtidos para  $t_i$  e  $t_m$ , nas pastas 1 a 5, foram aplicados nas equações 1 e 2 obtendo-se  $T_i(R)$  e  $T_f(R)$ , respectivamente.

As Figuras 10 e 11 apresentam, respectivamente, os gráficos com os resultados dos tempos  $T_i(R)$  e  $T_f(R)$ , obtidos por resistividade elétrica, para as pastas 1 e 5, com indicação dos tempos  $T_i(V)$  e  $T_f(V)$  obtidos por agulha de Vicat.

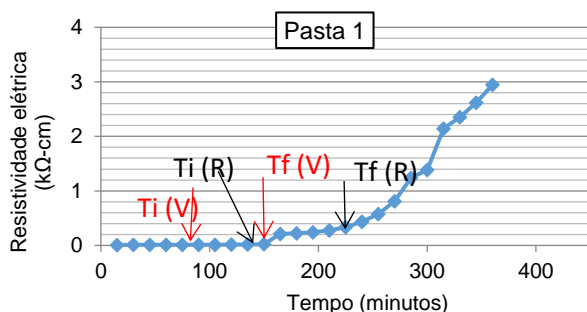


Figura 10: Resultados para pasta 1

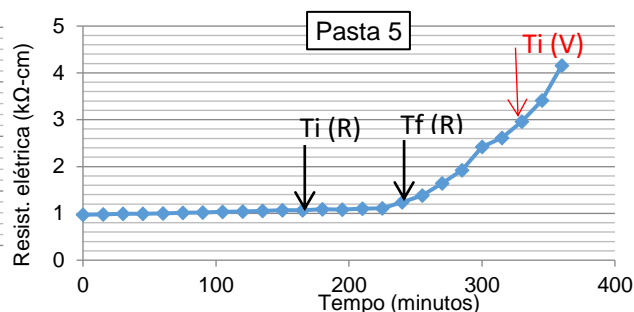


Figura 11: Resultados para a pasta 5

Observe-se que para a pasta 1 (C+A), os resultados de início e fim de pega por Vicat e resistividade, foram mais próximos que para a pasta 5 (C+MK+A+SP+P). Com a mistura dos aditivos químicos, os resultados de início e fim de pega por resistividade ficaram aparentemente mais coerentes com o comportamento de trabalhabilidade das pastas.

Em relação ao uso de aparato original desenvolvido para a presente pesquisa, verifica-se a seguir nas Figuras 12 e 13 comparativo dos resultados apresentados com os obtidos por Zongjin *et al.* (2007) na sua publicação com equipamento já patenteado. Os resultados demonstram que o aparato original aqui aplicado pode ser empregue para medição de tempos de início e fim de pega, por resistividade, em pastas com aditivos químicos.

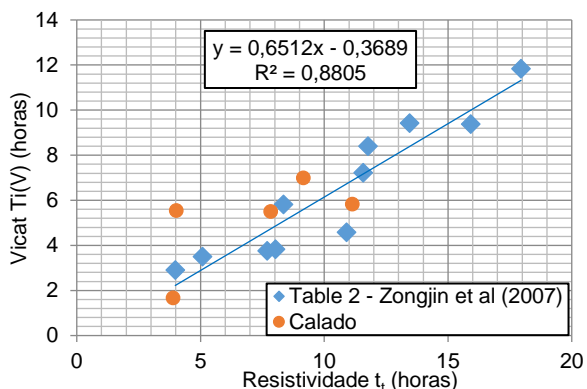


Figura 12: Correlação entre  $t_i$  e  $T_i(V)$

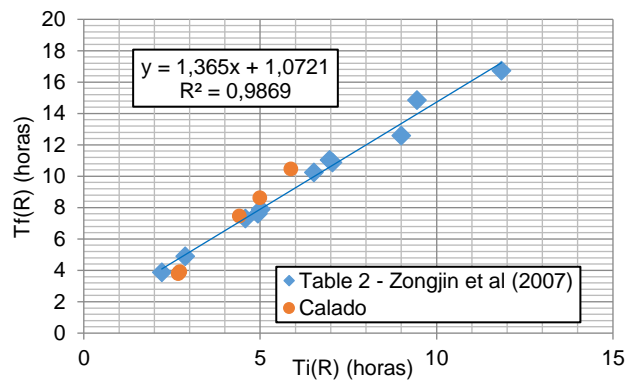


Figura 13: Correlação entre  $T_i(R)$  e  $T_f(R)$  obtidos por resistividade elétrica

### 3.3. Calorimetria

As Figuras 14 e 15 mostram os gráficos dos valores medidos do comportamento da temperatura da pasta ao longo do tempo após a mistura dos constituintes da composição, para as pastas 1 (C+A) e 2 (C+A+SP+P), respectivamente, que representam os menores e maiores tempos medidos. Para melhor visualização do comparativo de resultados de início e fim de pega por Vicat e resistividade, com o tempo  $T(C)$  que corresponde ao pico de calor encontrado no ensaio de calorimetria em cada pasta, foram indicados os tempos  $T_i(V)$ ,  $T_i(R)$  e  $T(C)$  no gráfico de calorimetria.

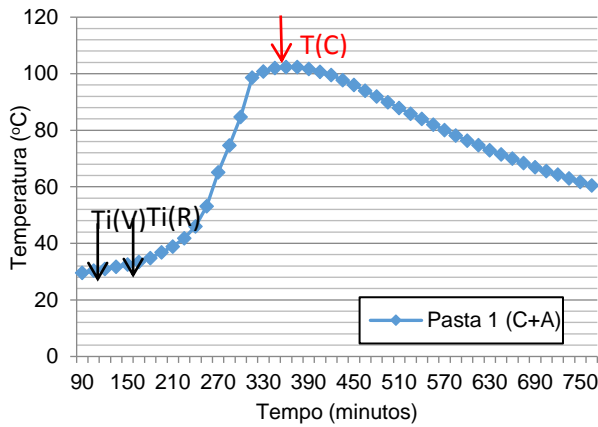


Figura 14: Calorimetria para a pasta 1

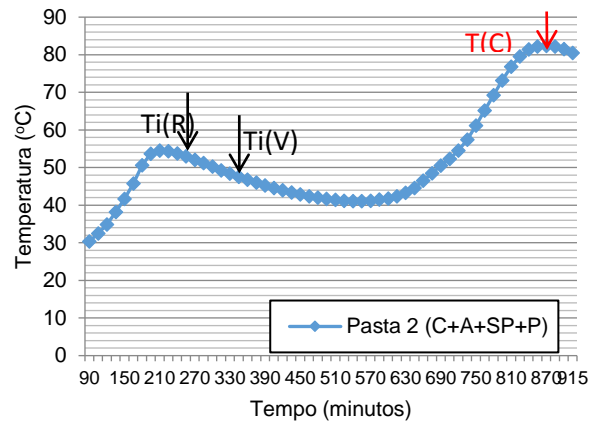


Figura 15: Calorimetria para a pasta 2

É possível observar que o tempo T(C) foi prolongado de forma acentuada na pasta 2 em relação à pasta 1, por conta da atuação dos aditivos químicos plastificantes (P) e superplastificantes (SP), conforme já observado para os tempos  $T_i(V)$  e  $T_i(R)$  nas pastas 1 e 5 e visualizados nas Figuras 10 e 11.

### 3.4. Cone Marsh

A Figura 16 apresenta gráfico dos valores da fluidez das pastas 2, 3 e 5, na temperatura de 32°C, nas medições realizadas em intervalos de 15 minutos após ao início dos ensaios. A Figura 17 mostra representação gráfica do percentual de perdas entre cada um dos tempos de medição da fluidez em relação ao tempo inicial de 15 minutos, onde se busca visualizar a evolução da perda de fluidez ao longo do tempo, até a conclusão dos ensaios.

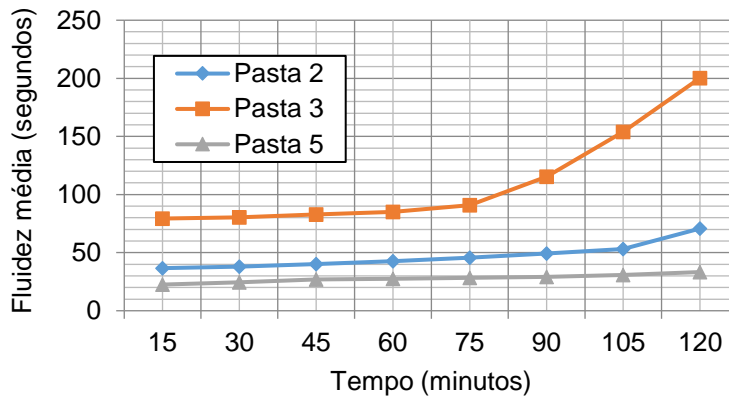


Figura 16: Resultados dos ensaios de cone Marsh para as pastas 2, 3 e 5

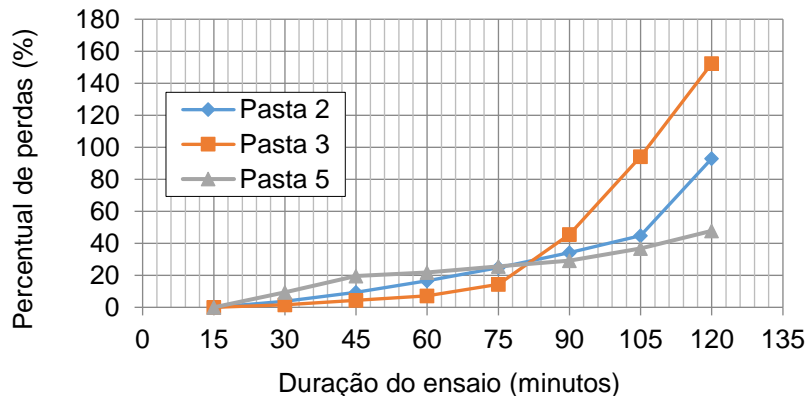


Figura 17: Percentual de perda de desempenho das pastas



Observou-se que os tempos de fluidez estão mais próximos para as pastas 2 (C+A+SP+P) e 5 (C+A+MK+SP+P) em relação à pasta 3 (C+A+SP). As pastas 2 e 5 possuem superplastificantes e plastificantes nas suas composições, enquanto que a pasta 3 possui apenas superplastificante. Observou-se ainda que o tempo de fluidez das pastas 2 e 5 apontam que a melhor trabalhabilidade é possível de ser obtida até os 105 minutos. A partir daí, acentua-se o aumento na curva do tempo de fluidez, que pode ser decorrente da perda de desempenho do superplastificante. Por outro lado, a pasta 3 apenas com superplastificante, demonstra desempenho inferior em relação às pastas 2 e 5, com maior tempo de fluidez e melhor trabalhabilidade limitada ao tempo de 75 minutos. Dessa forma, entende-se a razão do CAA aplicado na região do Recife, usualmente, possuir a associação de superplastificantes e plastificantes em suas composições.

#### 4. Conclusões

Após os estudos, foi possível constatar as seguintes conclusões:

- 1) A pasta 1 (C+A) foi a que apresentou o menor tempo de início de pega, 1,71 hora. Ao se adicionar o aditivo químico plastificante e superplastificante, isoladamente ou associados, verificou-se que o tempo de início de pega foi aumentado em pelo menos 3,2 vezes em relação à pasta composta apenas de cimento e água.
- 2) Foi possível estabelecer os tempos de início e fim de pega através de ensaios de resistividade elétrica, correlacionando-os aos resultados obtidos por agulha de Vicat, através de aparato simples desenvolvido para esses estudos. Esse aparato pode ser usado em laboratório de canteiro de obras;
- 3) Nos ensaios de cone Marsh, verificou-se que a fluidez das pastas com os aditivos químicos superplastificante e plastificante, atingia o tempo máximo de 2 horas para atendimento à trabalhabilidade necessária às operações de concretagem, desde o início da mistura até a conclusão do adensamento e acabamento do concreto nas formas;
- 4) O maior tempo de fluidez foi obtido ao associar superplastificante com plastificante em lugar do superplastificante aplicado isoladamente;
- 5) A redução da fluidez ao longo do tempo após o início dos ensaios, pode ser atribuída à perda de desempenho dos aditivos químicos;
- 6) Conforme objetivo da pesquisa ficou comprovado ser possível estabelecer o tempo disponível de trabalhabilidade a partir de ensaios aplicados em pastas;
- 7) A questão do tempo disponível de trabalhabilidade não pode ser considerada apenas pelo tempo de início de pega quando se adiciona aditivos químicos à pasta de cimento e água;
- 8) Verificou-se que, mesmo não tendo sido atingido o tempo de início de pega no ensaio de agulha de Vicat, a pasta com contendo aditivo químico apresentava mudança de comportamento no diagrama da resistividade elétrica, bem como não mais conseguia fluir através no ensaio de fluidez no cone Marsh.

## 5. Referências

- ABNT NBR 9204 (2012), Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica-Método de ensaio. (*Hardened concrete – Determination of the electrical-volumetrical resistivity-Test method*).
- ACI 116R-90 (1990), *Cement and Concrete Terminology*.
- ASTM C150/C150M (2015), *Standard Specification for Portland Cement*.
- CAMÕES, A. (2003), Dissertação de Mestrado (Título), Capítulos 3 e 7, na Universidade do Porto.
- DE SCHUTTER, G. (2012), *Hydration and microstructure. Joint IBRACON-RILEM Course on SCC*. Universiteit GENT. Maceió, Brazil.
- DESMET, B., ATITUNG, K. C., SANCHEZ, M. A. A., VANTOMME, J., FEYS, D., ROBEYST, N., AUDENAERT, K., DE SCHUTTER, G., BOEL, V., HEIRMAN, G., CIZER, Ö., VANDEWALLE, L., GEMERT, D. V. (2011), *Monitoring the early-age hydration of self-compacting concrete using ultrasonic p-wave transmission and isothermal calorimetry. Materials and Structures: 1537-1558*.
- LABRINCHA, J.A., RAUPP-PEREIRA, F., RIBEIRO, M. J., SEGADÃES, A. M. (2007), *Setting behavior of waste-based cements estimated by impedance spectroscopy and temperature measurements. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 46 [2] 91-96*.
- NEVILLE, A. M. (1997), *Properties of concrete – Fourth and Final Edition. Longman Group Limited, England. ISBN 0-582-23070-5*.
- SOROKA, I. (2004), *Concrete in Hot Environments. National Building Research Institute, Faculty of Civil Engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel*.
- ZONGJIN, L., XIAO, L., WEI, X. (2007), *Determination of Concrete Setting Time Using Electrical Resistivity Measurement. Journal of Materials in Civil Engineering 19, 423-427*.