

Controle contínuo da resistência de estruturas de concreto pelo método da maturidade

RAMOEL SERAFINI

DIMAS ALAN STRAUSS RAMBO

ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP)

RUBENS CURTI

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CIMENTO PORTLAND (ABCP)

ROBERT SOMOGYI

LIFT CARGAS GUINDASTES E OPERAÇÕES TÉCNICAS

RESUMO

Apresenta-se e se comenta em linhas gerais o Método da Maturidade para o controle da resistência à compressão das estruturas de concreto. Aplica-se o método em um estudo de caso de uma laje armada de um prédio residencial, que envolveu a fase de calibração (correlação entre temperaturas e tempos de cura de corpos de prova do concreto com suas resistências à compressão) e a fase de validação (correlação das temperaturas e tempos de cura da estrutura com suas resistências à compressão). Conclui-se pelo uso do método da maturidade na avaliação da resistência à compressão do concreto aplicado na estrutura em substituição parcial ou total à moldagem e rompimentos de corpos de prova.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, o preparo, controle, recebimento e aceitação do concreto empregado nas estruturas brasileiras são realizados segundo as premissas estabelecidas na norma ABNT NBR 12655:2015. Embora a normativa seja bastante recente, ela não se encontra isenta de deficiências. Para o entendimento dos conceitos a ser

apresentados, é necessário entender que existe um distanciamento das características do material recebido e amostrado em obra em relação àquelas do material que é efetivamente aplicado na estrutura. Essa não equivalência ocorre em virtude das diferenças ambientais, de exposição térmica, de geometria e volumetria, bem como oriundas do processo executivo a que o concreto está exposto, como interrupções no lançamento. Os fatores citados influenciam a resistência mecânica final do concreto em campo – uma vez que as reações de hidratação ocorrem de maneira contínua e em condições diferentes para cada situação – sendo isso um dos primeiros pontos críticos na metodologia de controle tecnológico do concreto defendido pela normativa.

A segunda deficiência que pode ser apontada está ligada ao processo de verificação da resistência à compressão pela moldagem de corpos de prova. No caso mais rigoroso previsto pela norma ABNT NBR 12655:2015, definido como controle do concreto por amostragem total (100%), prevê-se a moldagem de dois corpos de prova por betonada para verificação da sua conformidade com os requisitos de projeto. Neste caso,

os dois corpos de prova deverão ser ensaiados com 28 dias de idade para comparar o valor obtido com o valor de resistência característica especificado em projeto. Pode-se observar, então, que o concreto é um material cujo principal parâmetro de controle é verificado após, aproximadamente, um mês de idade. Esta diferença entre o tempo de execução e o tempo de ensaio faz com que o controle da qualidade da estrutura seja reativo e possua grande nível de atraso. O problema se agrava quando a intervenção na estrutura é dificultada pela existência de outros andares acima dos elementos não conformes. Nesta condição, a demolição de elementos defeituosos é frequentemente considerada inviável, restando um longo processo de avaliação da resistência residual da estrutura e, em alguns casos, a realização de onerosos procedimentos de reforço estrutural. Este cenário é fonte de um elevado nível de estresse e dúvida no meio técnico nacional, uma vez que parte significativa dos concretos atualmente produzidos no Brasil não atinge a resistência característica especificada em projeto, reduzindo o nível de confiabilidade da estrutura (Santiago, 2011).

O terceiro aspecto negativo é que a norma ABNT NBR 12655:2015 não especifica o método para controle periódico do módulo de deformação do concreto. Nesse contexto, entra em cena a norma ABNT NBR 6118:2014, que preconiza a realização de verificações a partir da estimativa do módulo de elasticidade. Essa estimativa prevê, inicialmente, a correlação do módulo de elasticidade com a resistência à compressão, sendo útil em termos de previsão de comportamento, porém não aplicável, ou mesmo aceitável, para o controle da estrutura. Dessa forma, o controle de deformação da estrutura acaba sendo realizado de modo indireto e adotando parâmetros, em grande parte, conservadores. Por fim, não ocorre a realização de planos de controle do módulo de elasticidade do concreto no estrito senso do termo. O que ocorre, então, é uma verificação esparsa da conformidade do material através de ensaios, com amostragem numa frequência muito baixa, que, em geral, apenas levanta dúvidas improdutivas com relação à conformidade da estrutura, sem permitir qualquer tipo de intervenção.

Portanto, na eventualidade de se viabilizar o controle do módulo de elasticidade em conjunto com o da resistência, haveria a possibilidade de viabilizar um controle efetivo das condições do concreto na estrutura. No caso de utilização do método de maturidade, conforme prescrito pela norma ASTM C1074-11, seria possível estabelecer os parâmetros intermediários que indicariam uma evolução inadequada de resistência do concreto e, dessa maneira, poder-se-ia intervir na estrutura de maneira mais imediata, evitando-se a construção de mais andares acima daquele com concreto não conforme. Outro aspecto de grande relevo está correlacionado com o controle da resistência e módulo de elasticidade para retirada de es-

coramento das fôrmas do concreto. Além disso, como a estrutura de concreto em campo sofre dos efeitos acima mencionados, o método da maturidade permite um acompanhamento mais precoce e representativo da evolução do ganho de resistência do concreto.

Há outras aplicações específicas que têm o seu sistema de controle diferenciado em relação à construção de edifícios. Este é o caso da produção de pré-moldados ou pré-fabricados. No caso da produção desses elementos, há a forte necessidade de se obter um controle da resistência de desforma, o qual é um parâmetro importante para que se evitem perdas por danos gerados durante este procedimento. A resistência de desforma é crítica para a condição de produção e pode ser o principal elemento definidor da produtividade da fábrica. Por essa razão, o controle dessa propriedade é fundamental para a qualidade dos elementos e, também, para a produtividade da indústria. No caso dos produtos pré-fabricados, há a possibilidade de pré-qualificação do produto. Ou seja, os elementos podem ser verificados previamente quanto à conformidade do concreto antes mesmo de serem enviados à obra. A prática usual é que esta verificação ocorra com 28 dias de idade, o que significa um grande tempo de estocagem, o que nem sempre é interessante. Assim, há também a necessidade de controle prévio de evolução da resistência, dado que, em frequentes casos, os componentes chegam à obra antes da idade indicada para a verificação da conformidade da resistência especificada em projeto. Dessa forma, o método da maturidade pode ter dupla vantagem em sua aplicação, garantindo o controle preciso da idade de desforma e, concomitantemente, da pré-qualificação do produto quanto às exigências de projeto.

Um dos principais fatores que influen-

ciam a dinâmica de hidratação e, consequentemente, a resistência mecânica do concreto é a temperatura de cura. Concretos curados em temperaturas mais elevadas desenvolvem resistência mecânica mais rapidamente nas primeiras idades, entretanto não obtêm ganho significativo na resistência mecânica final. Concretos curados em temperaturas menores obtêm menores resistências mecânicas iniciais e desenvolvem um maior ganho de resistência ao longo do tempo. Este efeito é conhecido na literatura como efeito “*crossover*”. Dessa forma, as resistências desenvolvidas por concretos moldados e armazenados em laboratório divergem daquelas desenvolvidas em condições reais de aplicação. Além disso, diferentes condições de exposição a intempéries – como frio, chuva, vento, umidade relativa do ar – impactam diretamente na temperatura do concreto e, consequentemente, na sua resistência.

Levando em conta o cenário apresentado, este artigo tem como objetivo a obtenção da curva de correlação do método da maturidade para a posterior estimativa da resistência à compressão do concreto, em uma obra de concreto armado situada na cidade de São Paulo. A técnica da maturidade foi aplicada através de monitoramento remoto e em tempo real na estrutura avaliada.

2. O MÉTODO DA MATURIDADE

Como a reação de hidratação do cimento possui um caráter exotérmico, há um aumento de temperatura do material à medida que ocorre. A evolução da resistência e do módulo de deformação do concreto irá depender do grau de hidratação do cimento, sendo que este grau de hidratação se associa à maturidade do concreto. Ou seja, quanto mais maduro for o concreto, mais hidratado é o cimento e, consequentemente, mais resistente



será o concreto. Logo, o método da maturidade é um conjunto de procedimentos que se utilizam da concepção de que a resistência mecânica do concreto pode ser relacionada diretamente à temperatura.

As duas funções de maturidade mais comumente utilizadas para aplicações envolvendo concreto na construção civil, e também recomendadas para controle da resistência mecânica à compressão pela norma americana ASTM C-1074:11, são o modelo fator tempo-temperatura e o modelo da idade equivalente em uma dada temperatura. A concepção de que a resistência mecânica do concreto poderia ser relacionada à temperatura nasceu na Europa, durante o início da década de 50, através do trabalho desenvolvido por Saul (1951). Naquela época, o conceito de maturidade apresentado era de que a mesma resistência mecânica seria atingida por concretos com um mesmo fator tempo-temperatura, também chamado de maturidade. Matematicamente, o modelo é (1):

$$M(t) = \int_0^t (T_t - T_0) dt \quad 1$$

Em que $M(t)$ é o fator tempo-temperatura (em °C-dias ou °C-horas); T_t é a temperatura (em °C) do concreto na idade t ; T_0 é a temperatura datum (em °C), na qual abaixo dela cessa o ganho de resistência; e dt é o intervalo de tempo em dias ou horas.

O equacionamento deste modelo assume que o ganho inicial de resistência possui um comportamento linear em função da temperatura, além de não computar eventuais variações de temperatura, sendo majoritariamente aplicável, portanto, em concretos em que as condições de cura não permitam grandes variações.

Sabendo dessas restrições, diversos pesquisadores desenvolveram modelos não lineares para a abordagem da maturidade. Entre os modelos mais aceitos, encontra-se o modelo de Arrhenius. Este modelo matemático é equivalente ao apresentado por Saul, entretanto assume uma relação exponencial entre resistência mecânica e tempo. Matematicamente, o modelo é (2):

$$t(e) = \int_0^t e^{\frac{E_a}{R}(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s})} dt \quad 2$$

Em que $t(e)$ é a idade equivalente na temperatura especificada T_s (dias ou horas); E é a energia aparente de ativação (em Kelvin); R é a constante universal dos gases (em kJ/mol.K); T_a é a temperatura aparente (em Kelvin) do concreto no intervalo dt ; T_s é a temperatura especificada (em Kelvin); dt é o intervalo de tempo em dias ou horas.

Essa metodologia tem sido adotada com sucesso na Europa por mais de 30 anos, principalmente com a intenção de averiguar as resistências iniciais do concreto (LAPANTE *et al.*, 1998; ROUSSEL *et al.*, 1998). A França, por exemplo, empregou o método da maturidade em diversas de suas obras de arte¹. Especial atenção deve ser dada à Ponte de Normandie (*Pont de Normandie* – França), obra em que se utilizou do método da maturidade de forma extensiva para concretos de elevada resistência mecânica (classe 60MPa, com sílica ativa), demonstrando elevada resistência nas primeiras idades. Neste projeto, o método da maturidade foi a única metodologia de verificação da resistência mecânica. Dessa forma, excluiu-se o uso de cilindros de concreto, garantindo uma melhor representatividade das reais resistências desenvolvidas em campo, além de otimi-

zar o ciclo produtivo sem riscos de segurança estrutural. Não somente países Europeus, mas também países americanos vislumbraram as vantagens do uso do método da maturidade. Os Estados Unidos da América, por exemplo, já utilizavam o método da maturidade no início do século XXI, tendo na época instituído protocolos para o método da maturidade com a intenção de acelerar as obras de construção civil (TIKALSKY *et al.*, 2001).

Os diversos projetos desenvolvidos com sucesso pelo mundo inteiro confirmam, portanto, que o método da maturidade é capaz de prover uma estimativa mais realista das resistências desenvolvidas em campo do que a moldagem de corpos de prova. Além disso, muito comumente o emprego do método da maturidade acelera o processo produtivo, permite a liberação para atividades subsequentes listadas em cronograma e possibilita a rápida tomada de decisão em caso de não conformidades com o concreto – algo que pelo método tradicional, só é possível após o rompimento dos corpos de prova.

Vale ressaltar que, para o correto emprego da técnica, é necessário despende esforços para o desenvolvimento e manutenção das curvas de correlação. Embora para um projeto com uma mesma especificação de concreto, a mesma curva de correlação possa ser utilizada, cada dosagem de concreto necessita de uma curva de correlação única, que varia de acordo com os insumos utilizados – como tipo de cimento, tipo de agregado, composição, entre outros. Dessa forma, é necessário um comprometimento elevado com o controle de qualidade na produção do concreto, a fim de serem fornecidos

1 EXEMPLOS: TÚNEIS “PAS DE L’ESCALETTTE” (1994); TORRES DE RESFRIAMENTO DA PLANTA NUCLEAR CIVAUX (1994); TÚNEIS MONTZJÉZIEU A75 (1995); TÚNEIS ROCHECARDONE DUCHÈRE (1995); VIADUTO NIÈVRE (1998)

lotes representativos da dosagem original para a curva de correlação e também para o projeto a ser construído. Por fim, faz-se necessária a constante verificação da adequação da curva de correlação para garantir a qualidade dos resultados obtidos em campo.

Sabendo, então, do potencial desta tecnologia, são necessárias três fases para a implementação do método da maturidade:

- a) Fase de calibração: consiste na mensuração da evolução da resistência à compressão do concreto durante a fase inicial do projeto. Nesta fase é elaborada a “curva de calibração do concreto”, o qual é submetido a cura úmida em laboratório (temperatura de $\sim 21^{\circ}\text{C}$);
- b) Fase de validação: esta fase ocorre nas primeiras semanas do projeto. Este é o momento de verificar se o modelo calibrado está adequado com a aplicação a que se destina o concreto. Após a validação do modelo, a curva de calibração se torna a curva referência e pode ser utilizada com confiabilidade no projeto;
- c) Aplicação em campo: utilização do modelo gerado para estimativa da resistência à compressão do concreto. Embora o modelo esteja validado, deve-se incluir nesta etapa verificações periódicas da adequação da curva referência.

Em suma, o método da maturidade pode ser aplicado com a função de estimar, com confiabilidade, a resistência mecânica do concreto aplicado em campo. Algumas das vantagens deste método são: o monitoramento progressivo da resistência à compressão do concreto; a dispensa parcial ou total do uso de corpos de prova para mensurar

a resistência do concreto; o aumento na velocidade construtiva de estruturas de concreto armado; e a maior reatividade em decisões que envolvam inconformidades do material aplicado na estrutura.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Dosagem do concreto

O concreto utilizado neste estudo foi fornecido pela Intercement Brasil S.A em caminhão betoneira com volume útil de 8m^3 . O consumo de materiais utilizados na dosagem do concreto pode ser encontrado na Tabela 1.

3.2 Fase de calibração

Na chegada do concreto à obra, 10 corpos de prova cilíndricos de $100 \times 200\text{mm}$ foram moldados conforme preconizado pela ABNT NBR 12655:2015. Dos corpos de prova moldados em campo, dois foram coletados e instrumentados com sensor RFID (*Wake Inc*) para obtenção do histórico de temperaturas desenvolvidas no concreto. Estes corpos de prova, assim como os 8 restantes, foram curados em câmara úmida, com temperatura controlada de $(22 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. Com o objetivo de calibrar o modelo, o histórico de temperaturas dos corpos de prova foi correlacionado com as resistências mecânicas à compressão do concreto nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias (dois corpos de prova por idade). Antes dos ensaios mecânicos, todos os corpos de prova tiveram suas superfícies retificadas mecanicamente. Os resultados de resistência à compressão potencial e TTF^2 para os corpos de prova acima citados estão apresentados na Tabela 2.

► Tabela 1 – Consumo de materiais utilizados na dosagem do concreto

Material	Consumo (kg/m ³)
Cimento CPV-ARI-RS	350
Brita 0	157
Brita 1	889
Areia fina	419
Areia industrial	345
Água	193
Superplastificante Mira 96	2,80

3.3 Fase de validação do modelo

Após a obtenção da curva de calibração, foi iniciado o processo de validação do método, com instalação de sensores RFID (*Wake Inc*) em uma estrutura de concreto (laje armada) de um prédio residencial localizado em Vila Siqueira, zona norte de São Paulo. A Figura 1 demonstra o procedimento adotado para a instrumentação da laje de concreto armado.

Através desta instrumentação fica possibilitada a obtenção do histórico de temperaturas do concreto em campo para posterior apuração da resistência mecânica. Os resultados obtidos a partir dos dados dos sensores instalados na estrutura foram então comparados com os dados da curva de calibração (referência), para obtenção da resistência mecânica pelo método da maturidade. A validação ocorre pela comparação entre os resultados obtidos pelo método e os resultados obtidos pelo rompimento de corpos de moldados durante a concretagem do elemento estrutural. Na fase de validação, apenas duas idades foram consideradas, 7 e 28 dias. Para

2 ÁREA SOB A CURVA TEMPO VERSUS TEMPERATURA PARA UMA IDADE T. EM INGLÊS, TTF (TIME-TEMPERATURE FACTOR).

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	TTF_CP1 (°C x h)	TTF_CP2 (°C x h)	TTF: Média (°C x h)
1	18,1	558,275	554,825	556,55
3	36,5	1.645,375	1.639,426	1.642,40
7	40,8	3.815,875	3.809,681	3.812,78
14	47,6	7.715,522	7.712,606	7.714,06
28	50,4	15.268,440	15.314,270	15.291,36

cada idade, 5 exemplares (10 corpos de prova) foram testados. Cabe ressaltar que o método de controle da obra foi o de amostragem total.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através da Figura 2, podem-se observar de forma clara as diferenças existentes entre os regimes térmicos estabelecidos no interior dos concretos curados no laboratório e em campo. Para

o primeiro caso, observa-se a manutenção da temperatura em cerca de 21°C (variação máxima de ± 1). No segundo caso, o regime é composto por ciclos repetitivos de aquecimento e resfriamento, os quais se estendem ao longo dos 28 dias de cura. Na imagem, é possível inclusive observar variações na intensidade dos ciclos. Os mesmos podem ser leves, como evidenciado entre os dias 16 e 17, ou bruscos, como nos dias 25 a 27. A amplitude térmica máxima evidenciada

entre os corpos de prova mantidos em ambiente controlado e os expostos ao ambiente foi de ~ 14 °C. Esses são alguns dos fatores que influenciam diretamente a capacidade de corpos de prova moldados e armazenados em laboratório representarem, com acurácia, a resistência do concreto *in-loco*.

A curva de calibração é a curva de campo que busca prever a resistência do concreto utilizado na laje, baseando-se no TTF obtido em campo pelo método da maturidade, sendo esta representada na Figura 3 por uma linha preta contínua. Esta curva é a que correlaciona a resistência mecânica em função da temperatura e do tempo de cura do concreto e precisa ser verificada periodicamente para garantir a sua aplicabilidade. Os pontos azuis, por sua vez, representam resistências dos corpos de prova que foram moldados em obra, a partir da mesma matriz de concreto, obtidas pelos ensaios convencionais de resistência à compressão. A comparação entre ambas as resistências, buscando a validação do método da maturidade, apresentou um erro menor que 13% para idade de 28 dias. As diferenças entre a previsão pelo método da maturidade e a resistência do concreto removido da estrutura (carotado) não ultrapassaram 20% para a idade de 28 dias. A diferença mais significativa em termos de resistência mecânica entre os corpos de prova preparados a partir de testemunhos extraídos e os corpos de prova moldados durante a concretagem ocorre devido ao efeito *crossover*, discutido de forma mais ampla na introdução deste artigo.

Levando em consideração que o cimento utilizado (CPV-ARI-RS) tem seu ganho de resistência mecânica desenvolvido, em sua maioria, nas primeiras idades do processo de hidratação

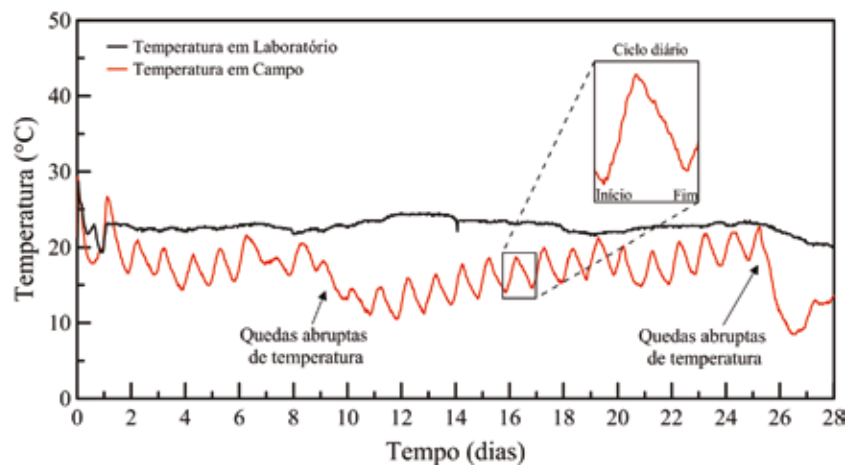


► **Figura 1**
Instalação dos sensores de temperatura junto à armadura da laje

pode-se concluir que os resultados da validação obtiveram uma boa aderência à curva de maturidade desenvolvida neste estudo. Evidencia-se, portanto, que a utilização do método da maturidade como estimativa da resistência à compressão do concreto a partir de um histórico de temperaturas é uma alternativa ao rompimento exaustivo de corpos de prova. Esta metodologia possibilita, portanto, o monitoramento progressivo da resistência à compressão do concreto e a redução, parcial ou total, do rompimento de corpos de prova para mensurar a resistência à compressão do concreto. Indiretamente essas medidas podem aumentar a velocidade construtiva de estruturas de concreto, além de garantir uma maior reatividade em decisões que envolvam inconformidades do material aplicado. Vale destacar que, embora o modelo esteja validado, deve-se incluir verificações periódicas para garantir a manutenção da curva de maturidade obtida. Em suma, o método da maturidade apresentou-se como uma possível ferramenta para estimar, com confiabilidade, a resistência mecânica do concreto aplicado em campo.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo discutiu-se a aplicação do método da maturidade em uma obra



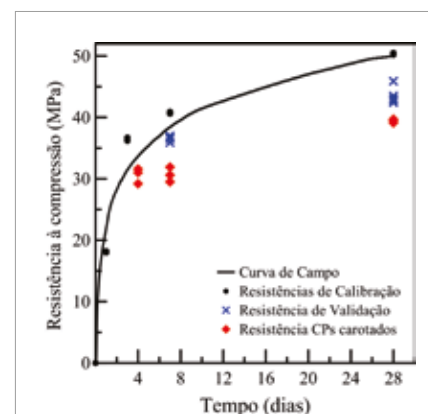
► **Figura 2**
Temperatura dos concretos mantidos em laboratório e *in loco* ao longo do período avaliado

no estado de São Paulo. As principais conclusões que podem ser verificadas neste artigo são:

- foi possível evidenciar a significativa diferença entre as temperaturas a que estão expostos os corpos de prova moldados e o concreto em condições reais de aplicação;
- o método da maturidade possibilitou a avaliação da resistência à compressão do concreto da obra, possibilitando a liberação, parcial ou total, do rompimento de corpos de prova.

Vale destacar que é de suma importância que as verificações periódicas da curva de maturidade sejam realizadas e documentadas de forma adequada, e que, em caso de não conformidade, os modelos sejam revistos e adequados

para garantir o controle do concreto, a integridade da estrutura e a segurança de seus ocupantes. 🏗️



► **Figura 3**
Curva de calibração e os valores de resistência de validação e do concreto removido da estrutura

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C1074-11. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. Philadelphia, 2011.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118, Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.
- [3] _____. ABNT NBR 12655, Concreto de Cimento Portland – Preparo, Controle, Recebimento e Aceitação – Procedimento, Rio de Janeiro, 2015.
- [4] SANTIAGO, W. C. Estudo da (não-)conformidade de concretos produzidos no Brasil e sua influência na confiabilidade estrutural. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2011.
- [5] Saul A.G.A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. Mag Concr Res, 1951, p.127-40.
- [6] TIKALSKY, P. J.; SCHEETZ, B.E.; TEPKE, D.G. Using the Concrete Maturity Meter for QA/QC. 2001. Pennsylvania Department of Transportation, relatório número PA-2000-026+97-42(22).
- [7] LAPANTE, P.; ROUSSEL, S.; LECRUX, S. Maturity-measurement technique: the Arrhenius law in the service of construction sites (em francês). In: Concrete, from material to structure. International RILEM Conference, Arles, France, 1998, p. 323-342.
- [8] ROUSSEL, S.; BOURNAZEL, J.P.; LECRUX, S. The maturity method as a means for evaluating strength properties and improving concrete durability (em francês). In: Science des matériaux et propriétés des bétons. Rencontre internationale, Toulouse, 1998, p. 205-213.

