

O método da maturidade para determinar resistência à compressão em concretos: revisão de literatura

I Beatriz Menezes **Santos**
UFMG

I Maria Teresa Paulino **Aguilar**
UFMG

I Eduardo **Chahud**
UFMG

RESUMO

O conceito de maturidade em concretos produzidos com cimento Portland está diretamente relacionado ao ganho de resistência à compressão. Este conceito busca relacionar o efeito do tempo e o histórico de temperatura para estimar o desenvolvimento desta propriedade mecânica durante o período de cura, quando a umidade está disponível para a hidratação do cimento. O procedimento mais utilizado para a estimativa da maturidade de concretos é atualmente preconizado pela ASTM C1074:2017, onde o concreto, monitorado *in loco* e submetido aos cálculos definidos pela norma, apresentará resultados de resistência à compressão que possibilitem, por exemplo, a retirada das formas sem a necessidade de resultados de ensaios destrutivos, uma alternativa ao consolidado teste de rompimento de corpos de prova, determinado nacionalmente pela ABNT NBR 5.739:2018. Neste estudo buscou-se apresentar a evolução histórica deste método, partindo dos estudos de Nurse, Saul, Carino e Lew, dentre outros, bem como relatar recentes resultados e incrementos ao método. Foi observada pouca literatura nacional acerca do tema, onde o histórico da utilização deste método, na sua maioria, em obras de concreto massa e pré-moldados. Apesar da pouca difusão deste método no Brasil, foi constatada a grande possibilidade de uso nas diversas tipologias construtivas que utilizam concreto, pois que os registros encontrados na literatura têm demonstrado resultados satisfatórios em concretos de tipologias semelhantes aos nacionais. Concluiu-se ainda que, devido à característica de ensaio não destrutivo, o Método da Maturidade é um importante contributo para a qualificação de concretos sem gerar desperdício de material com a confecção de amostras que serão posteriormente descartadas como é protocolo atual das diversas obras. Há ainda que ser mencionado o ganho de produtividade nos canteiros. Para tanto, o sucesso do uso do Método da Maturidade é dependente de critérios de projeto e também do rigoroso controle e conhecimento das propriedades dos materiais que constituirão o concreto a ser utilizado, para que as leituras feitas em obra sejam corretamente equalizadas de forma a gerar resultados confiáveis e em prol da segurança das edificações.

Palavras-chave: Concreto, Método da Maturidade, Resistência à Compressão, Energia de Ativação.

■ INTRODUÇÃO

Prever o comportamento do concreto ao ser aplicado em estruturas tem sido tema constantemente pesquisado em todo o mundo. Como resultado, vários procedimentos foram criados e deles vieram normas técnicas, protocolos e práticas, tanto em laboratórios, quanto em canteiros de obras, que objetivam padronizar e dar segurança à utilização do concreto de forma rastreável e com maior controle.

Na busca por qualificar concretos quanto ao seu comportamento mecânico pode-se citar, por exemplo, o ensaio de rompimento de corpos de prova cilíndricos à compressão em idades pré-estabelecidas, normalizado nacionalmente pela ABNT NBR 5.739 [1]. Há também ensaios que investigam a durabilidade dos concretos como o ensaio de resistividade elétrica [2, 3, 4], bem como ensaios para determinação do módulo de elasticidade [5], dentre outros.

Embora existam várias formas de qualificar concretos, como os mencionados anteriormente, há sempre o questionamento acerca de seus resultados *in loco*, pois que os corpos de prova nestes ensaios são manipulados em condições de cura, em sua maioria, diferentes dos locais onde os concretos são aplicados. Assim, de forma a dar maior exatidão aos resultados obtidos em laboratórios e nas obras, foi desenvolvido o Método da Maturidade. Um outro influenciador do desenvolvimento desse método foi o crescente número de acidentes por colapsos estruturais em obras recém concretadas, principalmente nos Estados Unidos e Europa [6].

Este método engloba um conjunto de procedimentos a serem realizados em laboratório e *in loco* com o concreto ainda em suas primeiras idades, de forma a prever o ganho de resistência à compressão. Seu principal fator de mensuração é a evolução do calor de hidratação, específico a cada tipo de concreto, e este é acompanhado em função do tempo de cura.

Para tanto, há inicialmente o processo laboratorial do concreto, onde argamassas e concretos de características semelhantes ao concreto que será lançado na obra é ensaiado até que seja definido o seu índice de maturidade [6-7] ou também, seu tempo equivalente [9]. Em um segundo momento, nos canteiros de obra, termopares são inseridos no concreto durante o processo de preenchimento das formas. Em períodos pré-estabelecidos em projeto, o calor gerado no interior da peça concretada é medido com o auxílio de equipamentos (multímetros, por exemplo), conectados aos termopares inseridos no concreto de forma a acompanhar a evolução do calor de hidratação [10, 11]. Estes resultados são tratados matematicamente e, então, é definido o momento em que aquela peça adquiriu a resistência à compressão esperada.

Seus principais benefícios englobam a possibilidade de desforma de peças concretadas em idades recentes, liberação de pavimentos, a possibilidade de aplicar uma nova camada de concretagem em obras de concreto massa [6-7]. Como resultado desses processos há,

também, o ganho de produtividade, pois estes procedimentos podem ser feitos tão logo o concreto alcance a sua maturidade, sem a necessidade de aguardar os rompimentos de corpos de prova a 7, 14 e 28 dias como preconiza a ABNT NBR 5.739 [1].

O Método da Maturidade é atualmente normalizado pela ASTM C 1074 [7]. Contudo, até que esta norma tivesse sido concretizada um longo caminho percorrido por pesquisadores como R.W. Nurse, H.S. Saul, N.J. Carino, dentre outros, teve que ser percorrido. Nesta revisão poderão ser vistos alguns dos trabalhos acerca da maturidade de concretos, bem como seus avanços, limitações e resultados, pesquisas que levaram autores de vários países a testarem o método em seus concretos.

A respeito da grande difusão do método a nível internacional, uma pesquisa feita pelo Departamento Norte Americano de Tráfego demonstrou que na grande maioria dos estados pesquisados (32 de 44 estados) utilizar o Método da Maturidade para liberação de pavimentos era prática comum [12]. Percebe-se uma grande oportunidade de uso na grande maioria das tipologias construtivas que envolvam a necessidade de aferir o ganho de resistência à compressão em concretos, pois nota-se na literatura publicados resultados positivos, inclusive resultados nacionais. Dessa forma, objetivou-se com este estudo aprofundar o entendimento sobre o Método da Maturidade, partindo do levantamento histórico de seu desenvolvimento, apresentando seus principais avanços e aplicações. Além disso buscou-se avaliar a possibilidade de utilização deste método em concretos nacionais por meio da verificação de estudos publicados, bem como pela comparação de resultados internacionais que obtiveram sucesso na utilização do método e se os materiais analisados nestas pesquisas se assemelham aos utilizados no Brasil.

Importante destacar que o Método da Maturidade faz parte do grupo de ensaios não destrutivos que em muito contribuem para a não geração de resíduos e diminuição de custos operacionais quando são comparados, por exemplo, com os ensaios de resistência à compressão via moldagem e rompimento de corpos de prova como o estabelecido pela ABNT NBR 5.739 [1]. Dessa forma, optar por ensaios não destrutivos é também uma forma de contribuir para a sustentabilidade do planeta. Para tanto, estudos como este que se propõe auxiliar na difusão dos benefícios de utilizar estes ensaios possibilitando a adesão de mais profissionais que optarão por estes testes.

■ METODOLOGIA

O presente artigo está inserido no campo da pesquisa qualitativa. Quanto à sua natureza trata-se de uma revisão de literatura.

Este estudo é constituído de um levantamento bibliográfico acerca do desenvolvimento do método da maturidade, evolução que culminou na norma técnica americana ASTM C 1074.

Neste levantamento busca-se analisar tanto a questão procedimental quanto os cálculos que foram desenvolvidos com o passar dos anos. Como um dos objetivos deste trabalho é verificar a viabilidade do uso do método da maturidade em concretos brasileiros, será também investigada a existência de trabalhos nacionais publicados na literatura que abordem o tema, de forma a entender o que há de evolução a nível nacional e o que ainda precisa ser desenvolvido.

De forma a nortear e facilitar a aquisição do aparato bibliográfico foi utilizada a metodologia desenvolvida por Ensslin *et al.* [13] denominada ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Construtivist*). Para a seleção textos estudados foram premissas a autenticidade, a representatividade junto à comunidade científica e a imparcialidade.

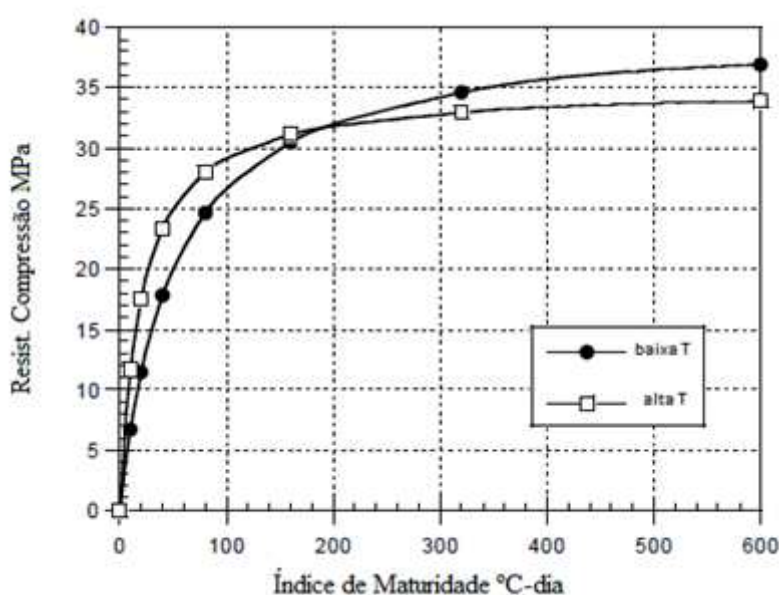
■ O MÉTODO DA MATURIDADE: CARACTERÍSTICAS E APLICABILIDADE

A ASTM C 1074 define maturidade como “a extensão do desenvolvimento de uma propriedade de uma mistura cimentícia” [7]. Este conceito, se aplicado ao Método da Maturidade, indica o momento pelo qual o concreto atinge a resistência à compressão esperada. Esta “maturidade” é avaliada no concreto nas primeiras idades, contudo, definir o que seria considerado como primeiras idades ainda não é consenso entre os pesquisadores [14]. Para melhor entendimento do método é prudente considerar como primeiras idades o período que vai até 28 dias após a mistura do concreto, pois, conforme apresentado na ASTM C 1074 [7], bem como no procedimento ASTM C 39 [15], esta é a data do último ensaio de verificação de ganho de resistência de projeto.

Os primeiros estudos acerca da maturidade do concreto datam das décadas de 40 e 50, na Inglaterra. McIntosh [16], Nurse [17] e Saul [18] foram os primeiros pesquisadores a falar sobre esta temática. Impulsionados inicialmente pelo desejo de prever a resistência do concreto curado a vapor, estudaram os efeitos da variação de temperatura no concreto em relação ao tempo. Dessa forma, surgiu o primeiro conceito de maturidade: “O concreto, da mesma mistura e na mesma maturidade (calculado em temperatura-tempo), tem aproximadamente a mesma resistência, qualquer que seja a combinação de temperatura e tempo para compensar essa maturidade” [18, tradução nossa].

Um importante ponto a ser destacado nestes primeiros estudos foi a relação não proporcional entre o ganho de maturidade, o aumento da temperatura e o ganho da resistência. Foi constatado que, ao se comparar concretos diferentes, para um mesmo índice de maturidade, os que possuem alto valor de temperatura nas primeiras idades nem sempre apresentaram os maiores valores de resistência à compressão em idades futuras, é o chamado “*crossover effect*” [6]. A Figura 1 mostra este efeito.

Fig. 1. Resultados de um concreto submetido a duas temperaturas de cura distintas em relação ao desenvolvimento de sua maturidade. Fonte: Adaptado de Carino e Lew [6].



Como pode ser observado, na Fig. 1, logo nas primeiras idades, a influência do gradiente térmico de cura pode ocasionar resultados distintos na medição de maturidade, o que leva a concluir que o método da maturidade somente pode ser utilizado com confiabilidade nas primeiras idades [6, 8, 19]. Outro ponto a ser considerado é que este efeito de cruzamento também é afetado pelo tipo de mistura cimentícia, por apresentar desenvolvimento distinto quanto ao calor e taxa de hidratação [20, 21], o que será explicado à frente (item 3.1.1).

Diante do exposto, e como o Método da Maturidade se trata de procedimentos que trarão dados a um modelamento matemático com as características intrínsecas do concreto, em busca de um resultado numérico que o qualificará, deve-se conhecer e estudar com cautela todas as variáveis desse processo.

Parâmetros de avaliação do concreto em relação à sua maturidade

O desenvolvimento do Método da Maturidade se baseia na quantificação do calor de hidratação (agente interno), na sua variabilidade no tempo e temperatura a qual é submetido (agente externo), bem como da energia de ativação aparente do concreto (E_a). Para entender melhor o método é necessário conhecer estes fatores, explanados brevemente a seguir.

Calor de hidratação

A variação da temperatura em concretos de pouca idade é um dos grandes indicadores do desenvolvimento das propriedades bem como apresenta indício de performances esperadas como endurecimento, ganho de resistência mecânica e durabilidade [11,

22]. As características de hidratação podem ser definidas a partir de um grupo de parâmetros que incluem, basicamente, a energia de ativação aparente e curvas de hidratação. Quanto maior este calor liberado, maior a quantidade de reações dentro da matriz do concreto [11]. Barbosa *et al.* [23] complementam que quanto maior a temperatura, mais acelerada é a taxa de hidratação.

Diversas pesquisas utilizam testes calorimétricos para aferir o desenvolvimento da hidratação, podendo ser estes isotérmicos [10, 11, 24, 25] e semi-adiabáticos [18, 19, 21].

Schindler e Folliard [21] bem como Xu *et al.* [11] explicam que o desenvolvimento da hidratação de concretos é variável e dependente da composição mineralógica dos materiais, do *design* da mistura, da inclusão ou não de aditivos, materiais cimentícios suplementares, misturas químicas e a presença ou não de polímeros. Ainda sobre a composição mineralógica é importante destacar a influência dos compostos do clínquer. Por exemplo, cimentos com altas concentrações de C_2S tendem a ter endurecimento lento e também baixa liberação de calor se comparados a cimentos com maior concentração de C_3A [14].

Uma relação matemática pode ser usada para definir o grau de desenvolvimento da hidratação. Alguns pesquisadores [11, 21, 22, 26] sugerem uma função exponencial para caracterizar a hidratação do cimento com base nos dados do grau de hidratação em relação ao tempo. A relação comumente usada é um modelo de três parâmetros definido na Eq. (1)

$$\alpha(t_e) = \alpha_u \cdot e^{-\left[\frac{\tau}{t_e}\right]^\beta} \quad (1)$$

Em que:

- $\alpha(t_e)$ é igual ao grau de hidratação em idade equivalente;
- t_e é igual à idade equivalente (ver Eq. 4) [horas];
- τ é igual ao parâmetro do tempo de hidratação [horas];
- α_u é o grau final de hidratação;
- β é igual ao parâmetro da forma de hidratação.

Segundo Xu *et al.* [11] α_u , τ , β , advém de curvas de hidratação que caracterizam os materiais cimentícios e, portanto, são específicos a cada tipo. Um alto valor de α_u indica que aquele material teve alta magnitude de liberação de calor. Em contrapartida, se o material teve alto valor de τ , indica que ele tem a característica de hidratar-se mais vagarosamente. Além disso, altos valores de β indicam que a taxa de hidratação fora expressiva. Poole *et al.* [22] complementam que mesmo que a Eq. (1) seja uma formulação empírica para quantificar o grau de comportamento de hidratação do concreto, na maioria dos casos, fornece uma

estrutura razoável para modelos preditivos, porque α_u , τ e β podem ser todos calibrados com dados de teste.

Durante o desenvolvimento do Método da Maturidade o calor de hidratação é o principal fator de mensuração, contudo, é de grande importância quantificar também a energia de ativação, que está diretamente ligada ao *design* do concreto e influenciará o comportamento da hidratação.

Energia de ativação aparente do concreto

A energia de ativação dentro do Método da Maturidade pode ser figurada como a “identidade” do concreto. Esta advém da química molecular. Foi proposta por Svante Arrhenius na última parte do século dezanove para explicar que as reações químicas não ocorrem instantaneamente quanto reagentes são colocados em contato [6, 27]. Arrhenius defendeu a ideia de que antes de um grande estado de energia ser ativado, os reagentes têm que adquirir uma energia que seja maior do que a barreira que tende a não reagir quimicamente [22, 28].

Brown e LeMay [27] explicam que em sistemas moleculares as partículas estão em movimento e a energia é transferida entre elas quando elas colidem. A medida que o número de colisões aumenta algumas moléculas adquirem energia suficiente para desencadear novas colisões. A partir daí a taxa de reações aumenta e, por consequência, a temperatura aumenta. Em outras palavras, Poole *et al.* [22] complementam que a teoria de Arrhenius é usada para capturar a sensibilidade à temperatura de uma mistura particular, de modo que seu comportamento possa ser modelado sob diferentes condições de temperatura.

É importante destacar que as proposições de Arrhenius partem de experimentos em sistemas de fases homogêneas e o concreto, por ser um compósito multi fase, onde as reações de hidratação não são uma simples reação, a energia de ativação de Arrhenius não pode ser aplicada diretamente à cinética do concreto. Na verdade, o que se determina medindo o aumento da temperatura em função do tempo, durante a hidratação dos grãos de cimento, pode ser chamada de energia de ativação aparente (E_a) [22, 23, 28].

A obtenção da E_a do cimento pode ser realizada por meio de experimentos calorimétricos, mecânicos ou medida diretamente a partir da evolução dos valores de água não evaporável [23]. Os estudos acerca da determinação da energia de ativação em concretos foram iniciados com experimentos isotérmicos por Carino em 1984 [28]. Estes, acrescidos de formulações matemáticas desenvolvidos por outros pesquisadores compõem o Anexo A da ASTM C 1074 [7].

Nokken [19] realizou um levantamento sobre ensaios de determinação de calor de hidratação. Constatou, a princípio, que diversos métodos foram utilizados: reológicos, calorimétricos, mecânicos e elétricos. A grande variação da E_a também foi observada, partindo

de 7,5 a 63 kJ/mol. Apesar disso, satisfatoriamente a grande maioria resultava na faixa entre 30-45 kJ/mol, em consonância à faixa de valores sugerida pela ASTM C 1074 [7]. Outra questão observada por Nokken [19] em seu levantamento: as energias de ativação determinadas em idades precoces são menores que 35 kJ/mol, enquanto àquelas determinadas em idades posteriores excedem 35 kJ/mol. Além disso a autora constatou que a E_a é menor em cimentos Portland acrescidos de cinzas volantes enquanto que a adição de escória apresenta resultados mais elevados.

Ainda sobre estes valores, é importante ressaltar uma importante contribuição ao Método da Maturidade advinda pelos estudos de Freiesleben-Hansen e Pedersen em 1977. Os autores apresentaram formulação genérica em função da temperatura do concreto (T_c), onde é considerado um intervalo de -10 °C a 80 °C [9]:

- a. para $T_c > 20$ °C: $E_a(T_c) = 33.500 \text{ J/mol}$
- b. para $T_c < 20$ °C: $E_a(T_c) = 33.500 + 1.470 (20 - T_c) \text{ J/mol}$

Estudos nacionais determinaram energia de ativação aparente dentro da faixa sugerida pela ASTM C 1074 – 40 a 45 kJ/mol - em concretos utilizando cimentos CP V [29, 30, 31]. A título de exemplo, a Tabela 1 apresenta os dados de E_a definidos pela pesquisa de Peres *et al.* [30]:

Tabela 1. Valores de Energia de ativação aparente para cimentos nacionais

Cimento	Valores de E_a (kJ/mol)
CP I - S	35,4
CP II – F 32	31,4
CP II – Z - 32	31,3
CP III	57,0
CP IV	50,4
CP - V	43,9

Fonte: Peres *et al.* [30].

Nota-se que a faixa média de resultados está próxima dos valores encontrados internacionalmente [7, 11, 19, 21, 27]. Contudo, os autores [30] sugerem novos experimentos em condições de temperaturas diferentes.

Determinação da energia de ativação: método experimental

De forma genérica, para a determinação da energia de ativação, segue-se o seguinte procedimento [7, 22, 32, 33]:

- c. cura de diferentes espécies de pasta de cimento em três temperaturas diferentes e constantes;

- d. determina-se a resistência à compressão em intervalos regulares de tempo;
- e. estabelece-se o valor de taxa constante para cada temperatura por meio de um relação idade-resistência para cada resistência-data;
- f. plota-se o logaritmo natural de taxa constante *versus* o inverso da temperatura de cura (em K);
- g. determina-se o melhor ajuste à equação de Arrhenius (Eq. 2), de forma a identificar a variação da taxa constante em relação à temperatura.

Carino e Tank [32] propuseram uma modulação matemática que pudesse representar a dependência de temperatura em uma taxa constante de ganho de resistência à compressão (k). Esta pode ser considerada uma adequação da equação de Arrhenius (Eq. 2), onde a E_a do concreto é inserida. Esta equação, base do cálculo da energia de ativação, é posteriormente apresentada como na Eq. (3) [22, 19].

$$k = A \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2)$$

Em que:

- R é a constante de gases natural: 8,314 [J / mol / K];
- T - temperatura [K] na qual a reação ocorre;
- k - taxa de evolução de calor [W];
- A - constante de proporcionalidade;

E_a - energia de ativação [J / mol].

Portanto, a E_a pode ser determinada pela inclinação do logaritmo natural da mudança da constante de taxa em relação ao inverso da temperatura, como dado na Eq. (3) [19]:

$$E_a = \frac{\Delta \ln k}{\left(\Delta \frac{1}{T}\right)} R \quad (3)$$

Em que:

- R é a constante de gases natural: 8,314 [J/mol/K];
- T = temperatura do concreto [°C].

Os parâmetros k e E_a podem ser determinados por várias formas:

- a. pela tratativa linear (Eq. 2);
- b. por assumir que a k segue uma função hiperbólica linear, onde o k é função da resistência à compressão [7, 19];

- c. por modelamento matemático hiperbólico parabólico [34];
- d. pelo método exponencial, onde os resultados apresentados tanto em idades recentes do concreto, quanto posteriores, têm sido assertivas [9, 6, 21].

A formulação matemática, bem como a metodologia experimental a que se trata as alíneas a-d, não serão abordados em detalhes neste artigo.

É importante ressaltar que qualquer propriedade medida em temperaturas variadas pode ser usada para determinar a E_a , no entanto, para utilizar os métodos hiperbólico linear, parabólico, hiperbólico ou exponencial, são necessárias medições ao longo do tempo, a propriedade deve aumentar monotonicamente (ou diminuir) com o tempo para um valor assintótico [19].

A partir do momento em que as propriedades que determinam a maturidade dos concretos são conhecidas, passa-se para a aplicação do Método da Maturidade.

O Método da Maturidade: aplicação

A aplicação do Método da Maturidade em obras é precedida por um estudo laboratorial. Além da determinação da energia de ativação, há a necessidade de se definir em laboratório o índice de maturidade, ou tempo equivalente. Para tanto, a ASTM C 1074 apresenta o procedimento para estabelecer esse índice [7].

Assim que o concreto é desenvolvido são feitos sete corpos de prova cilíndricos de (10x20) cm, obedecendo aos critérios da ASTM C 39 [15], que serão monitorados quanto ao avanço de sua temperatura em um tempo decorrido. A estas amostras são inseridos termopares que medirão a temperatura interna do corpo de prova. As amostras são mantidas em cura úmida com temperatura do laboratório controlada. As medidas de temperatura são colhidas constantemente e, a cada uma hora, rompe-se um corpo de prova à compressão [6, 7].

De posse dos resultados são feitas análises gráficas que correlacionem tempo x temperatura x resistência à compressão. A determinação da maturidade pode ser feita por dois métodos:

- a. fator tempo-temperatura, ou equação de Nurse-Saul, também chamada de Função Maturidade (Eq. 4), e;
- b. tempo equivalente, função desenvolvida por Freiesleben-Hansen e Pedersen [9] (Eq. 5).

A ASTM C 1074 deixa à critério do realizador do ensaio a opção por qual via de cálculo usar. Percebe-se, contudo, que os estudos mais recentes [19, 24, 36] têm preterido a Eq.

(5) à equação de Nurse-Saul por causa de sua limitação em idades mais avançadas devido ao efeito *crossover* apresentado anteriormente na Fig. (1).

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (4)$$

Em que:

- M é o índice de maturidade em °C-horas ou °C-dias;
- T é a temperatura média do concreto [°C] durante um intervalo de tempo Δt ;
- T_0 é a temperatura de referência (sugerida pela ASTM C 1074 de -10° C);
- t é o tempo de aferição [dias ou horas];
- Δt é o intervalo de tempo [dias ou horas].

$$t_e(T_r) = \sum_0^t e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_r} \right)} \cdot \Delta t \quad (5)$$

Em que:

- $t_e(T_r)$ é igual a idade equivalente à temperatura de referência T_r [horas/dias];
- T_c é igual à temperatura do concreto [°C];
- E_a e R são como definidos anteriormente.

A base desta equação (5) é determinar o efeito da temperatura na taxa de reações químicas que ocorrem durante o período de hidratação [9].

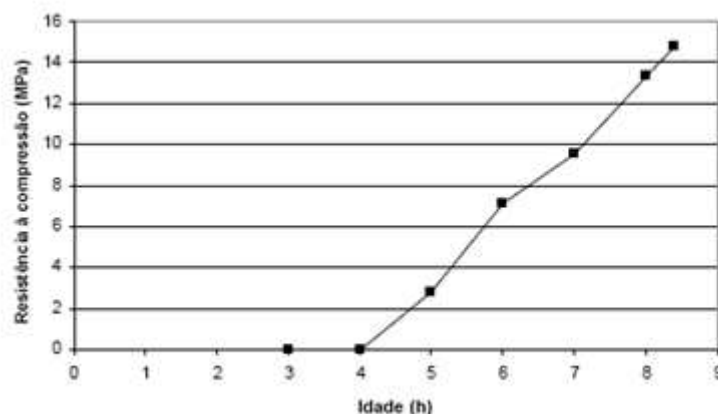
Após a determinação em laboratório do índice de maturidade, ou tempo equivalente, os projetos do canteiro de obras virão com esta informação. Na fase de preparação para concretagem os termopares são fixados às ferragens e concretados [7]. Ao término da concretagem inicia-se a medição da evolução do calor gerado na peça estrutural (Fig. 2) [35]. Quando essa temperatura atinge o índice determinado em projeto pode-se considerar que aquela peça estrutural atingiu a resistência à compressão esperada.

Figura 2. Leitura da temperatura do concreto em uma ponte recém concretada. Fonte: Engius [35].



Peres *et al.* [29] apresentam os resultados de um estudo de maturidade em vigas pré-moldadas. A Fig. (3) apresenta a relação resistência (MPa) x maturidade (horas) para uma viga de concreto. Nota-se que, por exemplo, próximo de 8 horas o concreto analisado adquiriu a resistência aproximada de 14 MPa.

Fig. 3. Curva resistência à compressão *versus* idade equivalente para uma viga pré-moldada. Fonte: Peres *et al.* [29].



Ainda sobre este estudo, Peres *et al.* [30] demonstraram aplicabilidade satisfatória do método em concretos pré-moldados, contudo foram constatadas variações nas curvas térmicas, que no caso da pesquisa em referência, influenciou os resultados de maturidade em até 17%.

Outros estudos brasileiros sobre o Método da Maturidade e a energia aparente de ativação podem ser encontrados. Salvador Filho [37] utilizou o Método da Maturidade para avaliar concretos de alto desempenho (CAD) com diferentes concentrações de adição de sílica ativa. O autor concluiu que o método proporcionou maior clareza quanto a obtenção das propriedades estudadas, contudo pondera que para acompanhamento do desenvolvimento do CAD há a necessidade de ciclos térmicos que extrapolem os limites do Método da Maturidade.

Estudos nacionais também avaliaram o uso do Método da Maturidade em diferentes aplicações e formulações do concreto: Santos [24] avaliou a influência do patamar de cura em concretos auto adensáveis com diferentes adições minerais; Scoaris *et al.* [25], assim como Peres *et al.* [30], avaliou pré-moldados de concreto, porém, desta vez, reforçados com fibras; Silva [38] verificou concretos com adições de cinzas de casca de arroz; enquanto que Silva *et al.* [10] testou concretos curados em gradientes térmicos superiores aos sugeridos pela ASTM C 1074 de forma a verificar a possibilidade de aplicar o Método da Maturidade em regiões com climas mais quentes. Por fim, Coelho [39] obteve resultados de maturidade como dados de entrada para o estudo de efeitos termomecânicos em obras de concreto massa em barragens. Nestes estudos mencionados os resultados foram conclusivos quanto à contribuição do Método da Maturidade para avaliar a propriedade dos concretos estudados.

■ CONSIDERAÇÕES FINAIS

Avaliar a possibilidade do uso do Método da Maturidade em concretos nacionais foi um dos objetivos desta pesquisa. Por isso optou-se, nesse final de revisão de literatura, por listar pesquisadores brasileiros que obtiveram sucesso, comprovando a possibilidade de uso do método neste país. Os estudos internacionais, relatados no decorrer desta pesquisa, apresentaram resultados satisfatórios, salvo as limitações e desafios que foram progredindo à medida que novas pesquisas eram desenvolvidas. Portanto, é de grande valia saber que nacionalmente também há a alternativa de se optar por um método que priorize ensaios não destrutivos.

Há também o fato de que o acompanhamento *in loco* da evolução da temperatura na peça concretada contribui para a produtividade, pois assim que o concreto atinge a resistência esperada pode-se liberar a próxima etapa construtiva. Isso poderá acontecer em idades diferentes do que é comumente feito nas obras brasileiras que, na maioria das vezes, seguem os tempos determinados na NBR 5.739 (7, 14 e 28 dias).

Além disso, extingue-se a necessidade de gerar corpos de prova no canteiro a cada concretagem para serem curados e rompidos à compressão nos tempos determinados, contribuindo para a redução do desperdício de concreto, evitando que corpos de prova sejam descartados como resíduo. Reduz também custos, pois não há a necessidade de gastos com ensaios laboratoriais pós concretagem. Em obras de parede de concreto, por exemplo, onde há muitas vezes a necessidade da criação de um laboratório de concreto exclusivo para a obra, esse custo seria suprimido.

As dificuldades a serem vencidas, que estão fora do escopo proposto por este trabalho, e são impulsionadoras de estudos futuros, são:

- a. avaliar os custos dos equipamentos de monitoramento, *softwares* e treinamento *versus* custos dos procedimentos usuais;
- b. há a necessidade de numerosos testes em obra, onde os resultados de maturidade do concreto, devido à variabilidade climática das regiões brasileiras, poderão sofrer a influência dos gradientes térmicos, diferentes das temperaturas controladas de laboratórios;
- c. avaliar também a responsabilidade e influência de vícios construtivos, erros na concretagem, tratamento dos dados e o seu efeito no resultado real se comparado ao laboratorial.

O resultado destes estudos poderia subsidiar o desenvolvimento de uma normalização nacional. Importante salientar que o intuito de estudos como este não é incentivar o abandono de práticas consolidadas de controle tecnológico do concreto, mas sim uma alternativa, não destrutiva, aos ensaios vigentes.

■ REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 5.739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
2. AMERICAN STANDARD TESTING METHODS. **ASTM C 1760**: Practice for estimating concrete strength by the Maturity Method. Filadélfia, 2017.
3. AMERICAN STANDARD TESTING METHODS. **ASTM C 39**: Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete. Filadélfia, 2012.
4. UNA NORMA ESPAÑOLA. **UNE 83.988**: Concrete durability. Test methods. Determination of the electrical resistivity. Part 1: Direct test (reference method). Espanha, 2003.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 9.204**: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
6. CARINO, N. J.; LEW, H.S. **The Maturity Method: from theory to application**. Washington: American Society of Civil Engineers, 2001. 19 p.
7. AMERICAN STANDARD TESTING METHODS. **ASTM C 1074**: Practice for estimating concrete strength by the Maturity Method. Filadélfia, 2017.
8. WADE, S. A.; SCHINDLER, A. K.; BARNES, R. W.; NIXON, J. M. **Evaluation of the Maturity Method to Estimate Concrete Strenght**. Alabama Department of transportation, 2006.
9. FREIESLEBEN-HANSEN, P.; PEDERSEN, E.J. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete. **Nordisk Betong**, v. 1, p. 21-25, 1977.

10. SILVA, C. A. R.; BARBOSA, M. P.; AKASAKI, J. L.; PINTO, R. C. A. Application of maturity concept in concrete with RHA addition. In: PRO 40: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES. **RILEM Publications**, 2004.
11. XU, Q.; HU, J.; RUIZ, M.; *et al.* Isothermal Calorimetry tests and modeling of cement hydration parameters. **Thermomecanica Acta**, v. 499, p. 91-99, 2010.
12. TEPKE, D.; TIKALSKY, P. J. Concrete maturity progress: survey of departments of transportation. **Transport Research Record**, v. 1775, p. 125–131, 2001.
13. ENSSLIN, L. *et al.* **ProKnow-C, knowledge development process - constructivist**. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI, 2010.
14. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.
15. AMERICAN STANDARD TESTING METHODS. **ASTM C 39**: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Filadélfia, 2018.
16. McINTOSH, J. D. Electrical curing of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 1, p. 21-28, 1949.
17. NURSE, R. W. Steam curing of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 1, n. 2, p. 79-88, 1949.
18. 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.
19. NOKKEN, M. R. Electrical conductivity to determine maturity and activation energy in concretes. **Materials and Structures**, v. 49, p. 2209-2221, 2016.
20. LOTHEBACH, B.; MATSCHEI, T.; MÖSCHNER, G.; GLASSER, F. P. Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 1-18, 2008.
21. SCHINDLER, A. K.; FOLLIARD, K. J. Influence of supplementary cementing materials on the heat of hydration of concrete. Advances. In: Cement And Concrete In: IX CONFERENCE COOPER MOUNTAIN CONFERENCE RESORT. **Anais...** Colorado, ago. 2003, p. 10-14.
22. POOLE, J.; RIDING, K. A.; FOLLIARD, K. J.; JUENGER, M. C. G.; SCHINDLER, A. K. Methods for calculating activation energy for Portland Cement. **ACI Materials Journal**, p. 304-311, jan./fev. 2007.
23. 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.
24. 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. 2010. 283 p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2010.

25. SCOARIS, M. R.; BARBOSA, M. P.; PINTO JÚNIOR, N. O. Aduelas pré-moldadas em concreto reforçado com fibras: avaliação das propriedades mecânicas pelo Método da Maturidade. In: I ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO. **Anais...** São Carlos, nov. 2005.
26. PANE, I.; HANSEN, W. Concrete hydration and mechanical properties under nonisothermal conditions. **Materials Journal**, v. 99, n. 6, p. 534-542, 2002.
27. BROWN, T. L.; LeMay, H. E. **Chemistry: The Central Science**. 4.ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988, p. 494-498.
28. CARINO N. J. The maturity method: theory and application. **Cement Concrete and Aggregates**, v. 6, n. 2, p. 61-73, 1984.
29. BARBOSA, M. P. *et al.* Avaliação da energia aparente de ativação do cimento CP-II E CP-V com adição de superplastificantes. In: VI SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO. **Anais...** 2006.
30. PERES, L. D. P.; BARBOSA, M. P.; PINTO, R. C. A. Determinação da energia de ativação para cimentos nacionais aplicando o procedimento ASTM C 1074-98. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45, 2003, Vitória. **Anais...**São Paulo: IBRACON, 2003.
31. CARVALHO, A. C. **Energia de ativação em concretos**: experimentação e modelagem. 2006. Tese (doutorado em engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002, 144 f.
32. CARINO N. J.; TANK, R. C. Maturity function for concretes made with various cements and admixtures. **ACI Mater Journal**, v. 89, 188-196, 1992.
33. TANK, R. C.; CARINO, N. J. Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 1, p. 74-83, jan./fev., 1991.
34. KNUDSEN, T. On particle size distribution in cement hydration. In: 7º CONGRESSO INTERNACIONAL DA QUÍMICA DO CIMENTO. **Anais...** Paris, 1980, p 1-170.
35. ENGIUS. **Case study**: Interstate 40 Bridge Reconstruction. Webbers Falls, Oklahoma. Disponível em: <<https://www.flir.com/globalassets/discover/instruments/concrete-curing/i-40-case-study.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2018.
36. PERES, L. D. P. **Avaliação de propriedades mecânicas de peças pré-moldadas submetidas à cura térmica pelo Método da Maturidade**: estudo de caso. 2006. 165 p. Dissertação (mestrado em engenharia) – Faculdade de Engenharia da Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2006.
37. SALVADOR FILHO, J. A. A. **Cura térmica dos concretos de alto desempenho**: análise das propriedades mecânicas utilizando o método da maturidade. 2001. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia da Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2001.
38. SILVA, C. A. R. **Aplicação do conceito de maturidade em concreto com adição de cinza de casca de arroz**. 2004, 130 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2006.