

Aplicação do método da maturidade em elementos estruturais pré-fabricados

ROBERTO CHRIST - PROF. - <https://orcid.org/0000-0003-1367-8972> (rchrist@unisinos.br);

ROBERTO L. CURRA - ENG. - <https://orcid.org/0000-0002-1308-2557> – **Curra Engenharia**

FERNANDA PACHECO - PROF. - <https://orcid.org/0000-0003-3455-491X>;

HINOEL Z. EHRENBING - PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-0339-9825>;

BERNARDO F. TUTIKIAN - PROF. - <https://orcid.org/0000-0003-1319-0547> – **UNISINOS**

RESUMO

A INDÚSTRIA DO PRÉ-FABRICADO É UM IMPORTANTE SEGMENTO DA CONSTRUÇÃO CIVIL E VEM SE TORNANDO CADA VEZ MAIS RELEVANTE NO CENÁRIO DA CONSTRUÇÃO, UMA VEZ QUE HÁ ESCASSEZ DE MÃO DE OBRA. A APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE PODE REDUZIR CUSTOS E AUMENTAR A VELOCIDADE DE PRODUÇÃO, PRINCIPALMENTE NA PRÉ-FABRICAÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS. O PRESENTE ARTIGO TEM COMO OBJETIVO EVIDENCIAR OS GANHOS DE PRODUTIVIDADE AO APLICAR O MÉTODO DA MATURIDADE EM UMA EMPRESA DE PRÉ-FABRICADO. PARA TAL, MONITOROU-SE A TEMPERATURA EM DOIS LOCAIS EM UM CONCRETO, AVALIANDO-SE O BENEFÍCIO DE TEMPERATURAS ELEVADAS NO PROCESSO DE CURA E ESTIMANDO A IDADE EQUIVALENTE DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO. OS RESULTADOS OBTIDOS INDICAM QUE EM 24H A RESISTÊNCIA DO CONCRETO DA PEÇA JÁ ERA EQUIVALENTE À 93,6H (EM CURA ISOTÉRMICA). A RESISTÊNCIA DE SAQUE DA PEÇA FOI ATINGIDA EM 11 HORAS.

PALAVRAS-CHAVE: CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO; MATURIDADE; RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO; PRÉ-FABRICADO.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos segmentos que mais emprega pessoas. Segundo a CBIC (Câmara Brasileira da Indústria da Construção), a construção civil, nos primeiros três meses de 2024, gerou 109.911 novos empregos com carteira assinada, o que representou uma alta de 16,85% em relação aos mesmos meses no ano de 2023. Mesmo com este crescimento de emprego, a falta de mão de obra na construção civil é elevada e tende a ser maior nos próximos anos. A pré-fabricação é uma maneira

de aumentar a produtividade e diminuir o desperdício da construção civil (COSTA; DALTRO, 2017), assim como reduzir os danos causados pela escassez de mão de obra (PERES, 2006). O aumento do uso do pré-fabricado na construção civil também auxilia na redução do consumo de recursos naturais, uma vez que o processo de produção é mais controlado e não há a necessidade de retrabalho (PELED, 2007; REINHARDT; KRÜGER; GROSSE, 2003).

O uso do método da maturidade para a determinação da resistência à compressão do concreto em tempo real, sem a necessidade de realizar ensaios em corpos de prova, já se mostrou eficiente em diversos estudos (CURRA *et al.*, 2021; HERBELÉ *et al.*, 2013; HU *et al.*, 2024; PERES, 2006). O método considera o efeito da temperatura na cura e no desenvolvimento de resistência, que pode ainda ser influenciada por aspectos como tipo de cimento, relação água/cimento, distribuição granulométrica dos agregados, cura, moldagem dos corpos de prova entre outros (CURRA *et al.*, 2021). Isto posto, o método precisa ser analisado na sua condição de aplicação.

A ASTM C 1074 (2019) estabelece o procedimento para se estimar a resistência à compressão do concreto por meio do método da maturidade. O uso deste método é uma maneira eficaz, que permite maior agilidade nas etapas subsequentes da construção civil, como remoção das fôrmas, aplicação de cargas de pretensão, saque das peças entre outras. A Norma também apresenta algumas limitações no uso deste método, são eles: (a) O concreto deve ser mantido em condições que permitam sua hidratação; (b) O método não contempla os efeitos da temperatura inicial na resistência final; (c) Este método deve ser complementado por outras análises do concreto; (d) Altas temperaturas em idades iniciais resultarão em uma previsão incorreta da resistência em idades finais; (e) O uso de registros de dados errôneos de temperatura ou energia de ativação, ou seja, inconsistentes com o concreto avaliado, pode levar a uma previsão incorreta da resistência à compressão. (CURRA *et al.*, 2021; PERES, 2006).

Este artigo apresenta um estudo de caso em que foi aplicado o método da maturidade em uma empresa de pré-fabricado para obter com maior precisão e segurança a resistência à compressão do concreto, visando otimizar os processos de produção, tais como desforma e movimentação de peças.

2. MATERIAIS E MÉTODO

Com a finalidade de determinar o tempo em horas em que a resistência à compressão do concreto atingiria a resistência de saque de 15 MPa, o método da maturidade

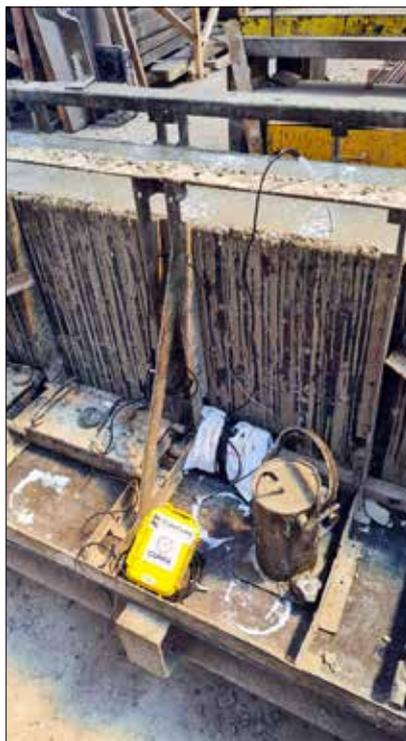
TABELA 1

PROPORÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DO CONCRETO

Material	kg/m ³
Cimento CPV-ARI RS	475
Areia média	550
Areia fina	350
Brita (9,5 mm)	1106
Aditivo superplastificante	2,5
Água	195



CENTRO DA SEÇÃO TRANSVERSAL



SUPERFÍCIE SUPERIOR

FIGURA 1

ELEMENTOS COM OS SENSORES INSTALADOS PARA OBTENÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO

foi aplicado em uma empresa de pré-fabricado. O concreto produzido pela empresa é de classe de resistência C50, com classe de abatimento S160, com resistência de saque de 15 MPa. O traço está apresentado na Tabela 1. O cimento utilizado é do tipo CPV-ARI, areia natural de rio, brita basáltica e aditivo à base de policarboxilatos.

Dois pilares com seção de 30 x 50cm e 50x80cm foram concretados e instalados os sensores (termistor NTC pré-calibrado de fábrica para desvio “zero”) para obter a temperatura ao longo do tempo. A instalação foi feita com mangueiras plásticas, de forma a proteger os termistores de quaisquer danos mecânicos e facilitar sua retirada. Os sensores foram instalados nos elementos em duas profundidades: a 5 cm da face superior de concretagem e no centro da seção transversal.

A concretagem foi executada em setembro de 2022. A temperatura ambiente, durante a concretagem, variou de 24°C e 28°C e a umidade relativa do ar entre 60% e 70%. A Figura 1 mostra os sensores instalados nos elementos. Também foram moldados corpos de prova para realizar a curva de calibração da maturidade (desenvolvimento da resistência em condi-

ção isotérmica). A medição da temperatura ao longo do tempo foi realizada por meio do sistema de monitoramento NEX[®] Monitoring System da CON-CURE[®], usando termistores reutilizáveis como sensores. Os dados coletados foram processados

pelo software NEX[®] e utilizou a equação de Arrhenius para o cálculo da maturidade. A configuração adotada considerou uma medição de temperatura a cada vinte minutos. A energia de ativação foi determinada pelo software NEX[®] da Con-Cure[®] e pela composição do concreto utilizado.

Foram moldados 12 corpos de prova para ensaios de resistência à compressão as 5, 9, 18 e 24 horas e 3 e 7 dias, em duplicata. Esses exemplares foram armazenados em sala climatizada sob condições controladas de temperatura e umidade de 23 ± 2°C e 65 ± 5%. Com o registro das resistências e das temperaturas do concreto, é possível conhecer e avaliar o comportamento da cura do concreto, do traço estudado, e a real resistência característica à compressão do concreto e a idade equivalente aos corpos de prova. As idades equivalentes encontradas significam o efeito da temperatura, e qual seria o intervalo necessário em condição isotérmica para o alcance da resistência estimada.

A maturidade do concreto é calculada com base na Lei de Maturidade de Arrhenius, que relaciona a taxa de hidratação do cimento à temperatura. Portanto, para fazer esse cálculo, é necessário medir a temperatura do concreto ao longo do tempo durante o processo de cura. O que é feito com o uso sensores de temperatura embutidos no concreto. Com os dados de temperatura

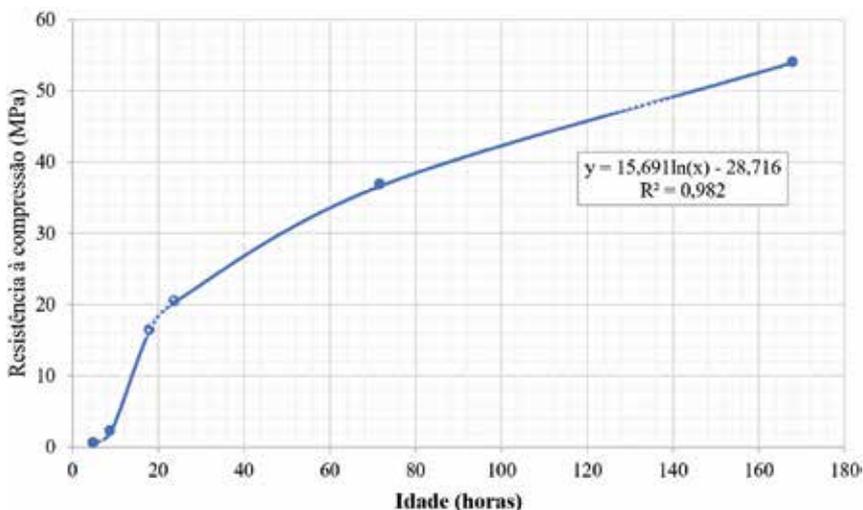


FIGURA 2

EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO EM TEMPERATURA ISOTÉRMICA

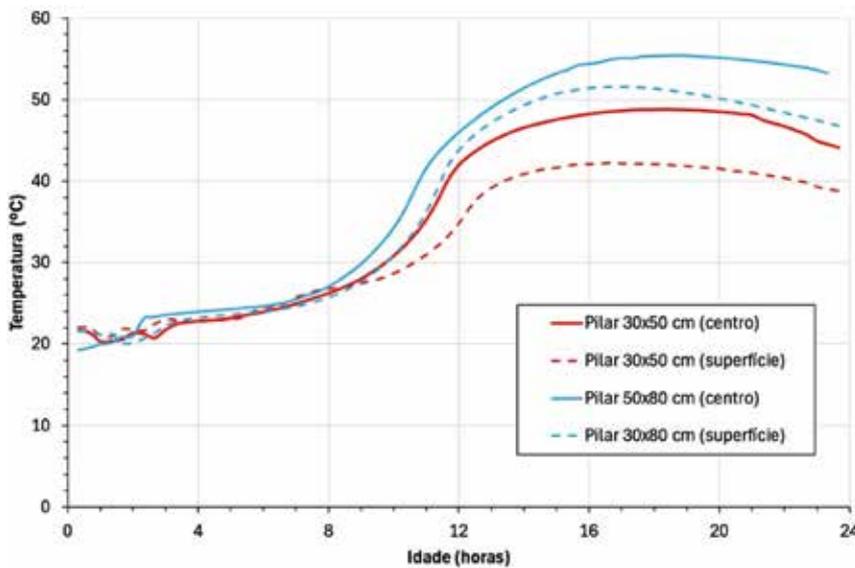


FIGURA 3
EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO DOS ELEMENTOS (CENTRO E SUPERFÍCIE)

coletados, utiliza-se a seguinte fórmula para calcular a maturidade do concreto:

$$[1] \quad M = \sum (t_i - t_{i-1}) \times F$$

Onde:

M: é a maturidade acumulada do concreto.

Σ : representa a soma dos valores para cada intervalo de tempo.

t_i : é a temperatura do concreto registrada no intervalo de tempo i .

t_{i-1} : é a temperatura do concreto registrada no intervalo de tempo anterior ($i-1$).

$F(T_i)$: é o fator de maturidade, que representa a taxa de hidratação do cimento a uma determinada temperatura.

3. RESULTADOS

3.1 Curva de ganho de resistência à compressão do concreto

Na Figura 2 é apresentada a curva de ganho de resistência à compressão do concreto utilizado pela empresa de pré-fabricados, juntamente com a equação da curva de ganho, onde a equação com função logarítmica foi escolhida, pois apresentou um maior coeficiente de determinação. Os resultados, por idade, representam a resistência média/potencial dos corpos de prova moldados e armazenados em condições de cura isotérmica.

É possível notar que a resistência à compressão do concreto apresenta tendência de crescimento padrão para o tipo de cimento empregado. Aos 7 dias, as resistências já superaram 50 MPa.

3.2 Monitoramento da temperatura do concreto

As curvas de desenvolvimento das temperaturas de cada elemento concreto são apresentadas na Figura 3.

É possível notar que há uma diferença significativa da temperatura no centro do elemento se comparado à temperatura mais próxima da face. Esta maior temperatura é devido à baixa condutividade térmica do concreto, onde o calor gerado pela hidratação do concreto não é dissipado

rapidamente como na superfície (TEKLE *et al.*, 2024). Com base no monitoramento da resistência nas duas geometrias do pilar e condição de instalação do sensor, são calculadas as idades equivalentes. Conforme citado, estas representam em um determinado momento, a idade equivalente do concreto curado em condição isotérmica, indicando assim a resistência que o elemento apresenta nesse momento. Como as condições climáticas foram de temperaturas médias a elevadas, houve um benefício no ganho de resistência e, conseqüentemente, na idade equivalente mensurada nos pilares. A Figura 4 exemplifica essa estimativa, considerando-se um pilar com geometria de 50 x 80cm, posição meio, em 24h.

Na Tabela 2 e Figura 5 são apresentados os resultados do estudo indicando a idade equivalente com base na idade real.

Como é possível perceber, o valor de idade equivalente estimada foi superior para as três condições (valor meio, ponta e médio) para os pilares com geometria de 30 x 50 como para 50 x 80cm. O uso do método da maturidade em elementos pré-fabricados com maiores dimensões pode otimizar o tempo de cura e aumentar a produtividade em empresas de pré-fabricado. A baixa difusividade do concreto faz com que peças de grandes volumes tenham um ganho de resistência diferencial ao longo da sua seção transversal, fazendo com que a peça possa ser sacada muito antes do

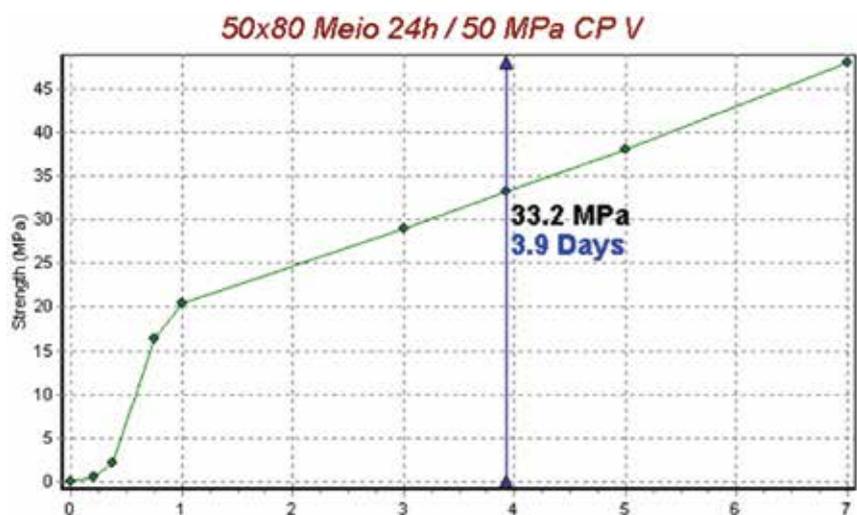


FIGURA 4
IDADE EQUIVALENTE OBTIDA NO PILAR DE 50 CM X 80 CM, POSIÇÃO MEIO, 24H DE CURA

TABELA 2

DADOS DE IDADE EQUIVALENTE

Pilar	Posição	Idade (h)		Resistência equivalente (MPa)
		Real	Equivalente	
50 cm x 80 cm	Centro	24	93,6	33,2
	Superfície	24	81,6	30,7
	Centro	18	69,6	28,4
	Superfície	18	60,0	27,0
	Centro	9	12,0	6,70
	Superfície	9	12,0	5,00
	Centro	5	4,80	0,80
	Superfície	5	4,80	0,60
30 cm x 80 cm	Centro	24	55,2	26,1
	Superfície	24	50,4	24,9
	Centro	18	45,6	24,3
	Superfície	18	40,8	23,4
	Centro	9	9,60	4,30
	Superfície	9	9,60	3,50
	Centro	5	4,8	0,60
	Superfície	5	4,8	0,60

tempo. De fato, o maior volume do elemento pode ter conduzido a um maior calor de hidratação percebido no interior do elemento. O sensor posicionado no meio do elemento resultou em uma maior resistência estimada em ambos os pilares.

4. CONCLUSÕES

Percebeu-se, após a estimativa dos valores de resistência à compressão, que houve um ganho em relação à condição isotérmica, chegando o pilar de 50 x 80cm, em 24h, a apresentar uma idade equivalente de 93,6h. Com isso, estima-se que nesse período de cura, a resistência do concreto já era superior a 33 MPa. Para além disso, notou-se que o setor localizado no centro dos elementos apresentou valores superiores ao de ponta,

considerando os períodos de 18h e 24h para os dois pilares. Foi possível concluir ao longo desse estudo que houve um benefício decorrente da exposição em temperaturas de medianas à elevadas, beneficiando esse ganho de resistência. Também é importante destacar que em elementos de grandes dimensões, a seção transversal apresenta diferentes resistências, assim a resistência do corpo de prova moldado e acomodado em condições padrão de cura vai apresentar resistências menores do que efetivamente terá na peça moldada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Curra Engenharia e do itt Performance UNISINOS. ☺

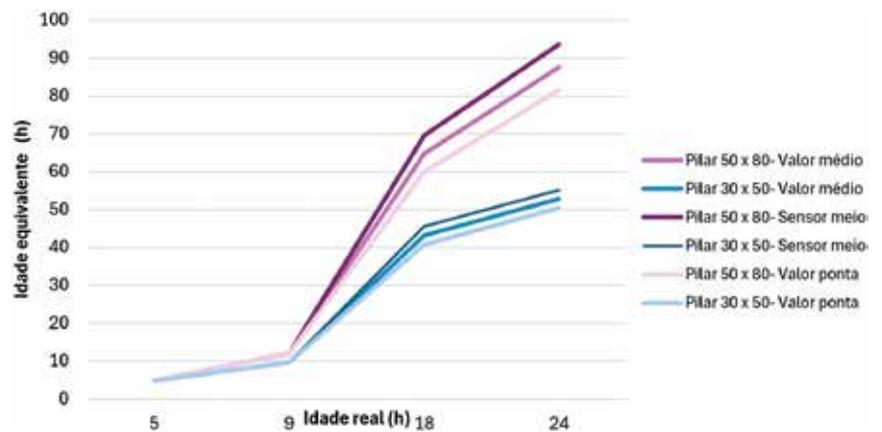


FIGURA 5

VALORES DE IDADE EQUIVALENTE PARA OS DIFERENTES PILARES E CONDIÇÕES

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASTM, A. S. FOR T. AND M. C1074-19 - Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. West Conshohocken, PA ASTM International, 1 jun. 2019. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C1074-19>>
- [2] COSTA, J. E. M.; DALTRO, A. T. SISTEMAS CONSTRUTIVOS INDUSTRIALIZADOS UTILIZADOS NO BRASIL : UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA. (U. F. do M. Grosso, Ed.) Mato Grosso: 2017.
- [3] Curra, Roberto Luiz; Pacheco, Fernanda; Ehrenbring, Hinoel Zamis; Christ, Roberto; Patzlaff, Jeferson Ost; Trevisan, Rafael; Tutikian, Bernardo Fonseca. Application of the maturity method to reinforced concrete roof slabs. Revista Materia, v. 26, n. 4, 2021.
- [4] Herbelé, Lucas; Pacheco, Fernanda; Caldas, Daniel; Tutikian, Bernardo Fonseca. Estudo da maturidade em obra de médio porte de construção convencional: estudo de caso. Gramado, 2013. (Nota técnica).
- [5] Hu, Guobiao; Yang, Yaowen; Mohanty, Lipi; Chae, SoungHo; Ishizeki, Kohsuke; Tang, Lihua. An electromechanical impedance measurement-based solution for monitoring fresh concrete maturity. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 35, n. 10, p. 907-919, 8 jun. 2024.
- [6] PELED, A. Pre-tensioning of fabrics in cement-based composites. Cement and Concrete Research, v. 37, n. 5, p. 805-813, maio 2007.
- [7] PERES, L. D. P. AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS PRÉ-MOLDADAS SUBMETIDAS À CURA TÉRMICA PELO MÉTODO DA MATURIDADE: ESTUDO DE CASO. Dissertação de Mestrado—São Paulo: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA, 2006.
- [8] REINHARDT, H. W.; KRÜGER, M.; GROSSE, C. U. Concrete prestressed with textile fabric. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. 3, p. 231-239, 2003.
- [9] Tekle, Biruk Hailu; Al-Deen, Safat; Anwar-Us-Saadat, Mohammad; Willans, Njoud; Zhang, Y. X.; Lee, Chi King; Ribakov, Yuri. Maturity method to estimate early age concrete strength in cold weather: alternative activation energy calibration. Australian Journal of Civil Engineering, v. 22, n. 1, p. 1-12, 2024.