

# Modelagem e retroanálise do comportamento térmico do concreto em protótipo e fundação *in loco*

PATRÍCIA GUEDES GAMBALE – MESTRE

CONCRECON CONCRETO E CONSTRUÇÕES LTDA.

EDUARDO DE AQUINO GAMBALE – ESPECIALISTA

NICOLE PAGAN HASPARYK – DOUTORA

ELETROBRAS FURNAS

JEFERSON LUIZ BRONHOLO – MESTRE

LACTEC

## RESUMO

O MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO CONCRETO NAS PRIMEIRAS IDADES É MUITO IMPORTANTE PELO FATO DE QUE SE PODEM DEFINIR PRECOCEMENTE RISCOS FUTUROS DE FISSURAÇÕES DEVIDO À GERAÇÃO DE CALOR INTERNO EM DECORRÊNCIA DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO. ESTE TRABALHO TEM POR OBJETIVO MODELAR O COMPORTAMENTO DAS TEMPERATURAS GERADAS NO INTERIOR DA MASSA DE CONCRETO E REALIZAR RETROANÁLISE. PARA TANTO, FOI CONFECCIONADO UM PROTÓTIPO DE CONCRETO CONTENDO CIMENTO DO TIPO CP V E UM BLOCO DE FUNDAÇÃO EM CAMPO UTILIZANDO CIMENTO DO TIPO CP II-F. AS TEMPERATURAS FORAM AVALIADAS POR MEIO

DE TERMOPARES INSTALADOS INTERNAMENTE. AS MODELAGENS FORAM REALIZADAS TANTO PARA O PROTÓTIPO COMO PARA UM CASO REAL DE FUNDAÇÃO DE FORMA A CONFRONTAR OS DADOS OBTIDOS, ALÉM DE TER SIDO ANALISADA A PROBABILIDADE DE INCIDÊNCIA DE FISSURAS DE ORIGEM TÉRMICA. OS RESULTADOS REFORÇAM A IMPORTÂNCIA DE UM ESTUDO PRELIMINAR DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO CONCRETO POR MEIO DE MODELAGENS E ENSAIOS DE FORMA A ATUAR PREVENTIVAMENTE, MITIGANDO A FISSURAÇÃO DE ORIGEM TÉRMICA, BEM COMO OUTRAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENVOLVENDO REAÇÕES QUÍMICAS EXPANSIVAS.

**Palavras-chave:** concreto, comportamento térmico, calor de hidratação, modelagem, fundação.

## I. INTRODUÇÃO

As reações químicas decorrentes da hidratação do cimento possuem natureza exotérmica e o calor gerado vai variar em função do tipo de composto da composição química do cimento envolvido (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Os picos de temperatura que um concreto pode alcançar em decorrência dessas reações exotérmicas também podem variar em função de vários fatores e, em especial, da composição química e do tipo de cimento empregado, finura e consumo do aglomerante (GAMBALE 2015; GAMBALE *et al.*, 2019). Qualquer concreto pode

atingir elevadas temperaturas sem, necessariamente, ser curado termicamente. Concretos massa, bem como aqueles contendo elevados consumos de cimento, e os confeccionados com cimentos de alta resistência inicial, são mais susceptíveis ao atingimento de elevadas temperaturas.

Taxas de aquecimento e resfriamento mais altas podem trazer riscos de fissuração ao concreto. A partir do momento em que a temperatura máxima atingida tender ao equilíbrio térmico com o ambiente, surgirão as tensões de tração, trazendo riscos de fissuração, caso seus valores superem a sua capacidade resistente.

As fissuras geradas nessa etapa podem trazer para o elemento estrutural reflexos negativos no seu desempenho e durabilidade. Isso porque, com a formação de caminhos preferenciais para a água e outros agentes externos, por meio da percolação através das fissuras, pode-se comprometer mais ainda a qualidade do concreto. Desta forma, além da fissuração inicial pelo comportamento térmico inadequado atingido pelo concreto e redução da sua capacidade resistente, outras manifestações patológicas poderão se instalar na estrutura, agregando mais danos estruturais e afetando, por conseguinte, a vida útil. (SCHOVANZ *et al.*, 2021).

Considerando, por exemplo, blocos de transição e fundação, elementos estruturais que suportam uma edificação, torna-se imprescindível a avaliação prévia do potencial comportamento térmico do concreto a ser empregado de forma a evitar possíveis danos bem como riscos de colapsos (GAMBALE *et al.*, 2019).

Diante do exposto, este trabalho apresenta resultados de calibração de modelo para prever o nível de temperatura que pode ser atingido no interior do concreto em diferentes condições, bem como resultados reais de estruturas que sofreram elevadas temperaturas e riscos de redução de vida útil.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Variáveis estudadas

As variáveis estudadas neste programa experimental, visando atingir os objetivos do trabalho, são o tipo e o consumo do cimento empregado no concreto.

#### 2.1.1 TIPO DE CIMENTO

Para a realização desse trabalho, foram utilizados os cimentos Portland CP V-ARI e o cimento Portland CP II F-40. No protótipo do bloco, foi utilizado o cimento CP V-ARI, por apresentar um comportamento mais agressivo no que diz respeito às temperaturas geradas pelo calor de hidratação, e a escolha pelo cimento Portland CP II F-40 para aplicação em campo, justifica-se pelo fato de ser o cimento mais comumente empregado no estado de Goiás, região do estudo.

#### 2.1.2 CONSUMO DE CIMENTO

No protótipo do bloco, foi utiliza-



### ► Figura 1

Protótipo do bloco a ser concretado e termopares instalados em seu interior, para o monitoramento da temperatura, além dos extensômetros – área de envelhecimento de Furnas – GO

Fonte: FURNAS

do um consumo de cimento Portland CP V-ARI igual a 471 kg/m<sup>3</sup>; já na análise de campo, utilizou-se um consumo de 315 kg/m<sup>3</sup> de aglomerante, sendo o cimento Portland, do tipo CP II F-40, e ainda a adição de 10% de sílica ativa em substituição à massa de cimento, com o intuito de atender a resistência solicitada em projeto, e visando a um menor consumo do aglomerante hidráulico.

### 2.2 Materiais empregados

Para confeccionar os concretos utilizados neste trabalho, foram empregados os dois tipos de cimento Portland citados anteriormente, além de agregados graúdos graníticos e miúdos, disponíveis no estado de Goiás. A caracterização dos materiais foi baseada na referência Equipe de FURNAS – Editor Walton Pacelli de Andrade (1997).

### 2.3 Método

#### 2.3.1 PROTÓTIPO

Após a realização de todas as caracterizações dos materiais com-

ponentes dos concretos estudados e desenvolvidos os traços de concreto, foram concretados alguns protótipos de bloco de fundação em duas áreas de envelhecimento natural por meio de um projeto de P&D Furnas Aneel intitulado “Metodologias e infraestrutura tecnológica para aperfeiçoamento das avaliações de confiabilidade e otimização de empreendimentos de energia” (Hasparyk *et al.*, 2021). Uma área está localizada no estado de Goiás (nas dependências de Furnas), e a outra no estado do Paraná (dentro das instalações do Lactec). Os blocos eram cúbicos e continham as dimensões de 0,80 x 0,80 x 0,80 metros, conforme apresentado na Figura 1.

Com o intuito de diminuir a dispersão da temperatura interna do bloco, gerada pelo efeito exotérmico decorrente do processo de hidratação do cimento, foram utilizadas placas de isopor revestindo as laterais internas da fôrma (Projeto de P&D FURNAS ANEEL).

De forma a monitorar a curva exotérmica, foram instalados do interior do bloco quatro termopares, em locais variados, incluindo um no centro do bloco.



### ► Figura 2

Foto de parte do bloco concretado (à esquerda) e termopar instalado no centro (à direita) para o monitoramento interno de temperatura

Para o monitoramento ao longo do tempo em relação às possíveis expansões geradas por tensões internas, foram instalados um extensômetro de haste (específico e desenvolvido pelo projeto de P&D Furnas) e um extensômetro elétrico tipo Carlson (M-8).

### 2.3.2 BLOCO DE FUNDAÇÃO DE OBRA NO ESTADO DE GOIÁS

Foi também monitorado em campo um bloco de fundação localizado em

obra de edificação (Estado de Goiás) para posterior retroanálise térmica. Na Figura 2, observa-se foto do bloco concretado e detalhe do termopar instalado para o monitoramento das temperaturas no centro do bloco.

O bloco de fundação em análise foi concretado em camadas, com volume de aproximadamente 100 m<sup>3</sup> nas duas primeiras camadas e altura aproximada de 80 cm, e de 140 m<sup>3</sup> na última camada, com altura aproximada de 1 metro.

O traço do concreto utilizado no bloco (1:2,7:3,7) contemplou um consumo de cimento de 315 kg/m<sup>3</sup> (tipo CP II F-40), 10% de sílica ativa em substituição ao cimento (em massa), além de aditivos do tipo superplastificante e polifuncional. A relação água cimento manteve-se em 0,52.

Algumas metodologias de estudo de dosagem, como a utilizada no Laboratório de Concreto

de Furnas Centrais Elétricas S.A (GST.E – Aparecida de Goiânia/GO) trabalham com a proporção de aglomerante no concreto (cimento com adição) por meio da definição de cimento equivalente. Para se calcular o consumo de cimento equivalente no traço, de modo a poder utilizar esse dado no modelo de previsão, a Equação 1 foi adotada (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

$$C_{eq} = M_{cim} + \frac{(\gamma_c \cdot M_{ad})}{\gamma_{ad}} \quad [1]$$

Onde

$C_{eq}$  = cimento equivalente (kg/m<sup>3</sup>);

$M_{cim}$  = massa de cimento (kg);

$M_{ad}$  = massa de adição (kg);

$\gamma_c$  = massa específica do cimento (kg/m<sup>3</sup>);

$M_{ad}$  = massa específica da adição (kg/m<sup>3</sup>).

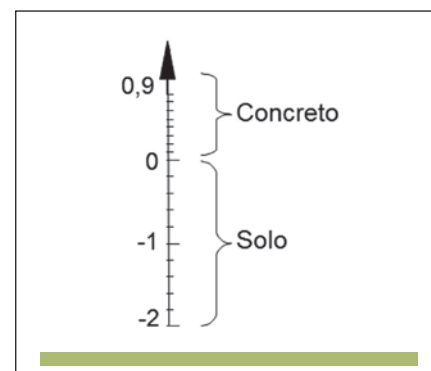
### 3. MODELAGEM

O modelo de previsão proposto pela pesquisa foi desenvolvido com base em modelo apresentado e utilizado por Gambale (2015) para a avaliação de temperatura máxima e da tensão em concretos de características massivas. São colocados todos os dados de entradas necessários para a análise, sendo de grande importância

	74	75	76	77	78	79	80		
73	57	58	59	60	61	62	63	64	81
64	49	50	51	52	53	54	55	56	72
55	41	42	43	44	45	46	47	48	63
46	33	34	35	36	37	38	39	40	54
37	25	26	27	28	29	30	31	32	45
28	17	18	19	20	21	22	23	24	36
19	9	10	11	12	13	14	15	16	27
10	1	2	3	4	5	6	7	8	18
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

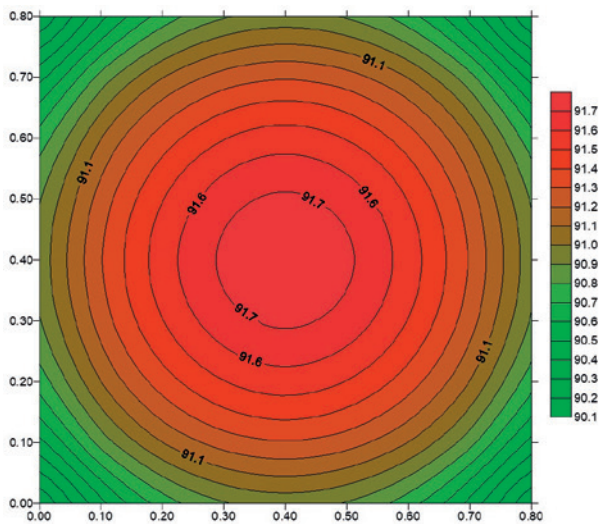
### ► Figura 3

Malha para propagação de calor em duas dimensões de 64 elementos finitos e 81 nós – blocos de 80 x 80 cm



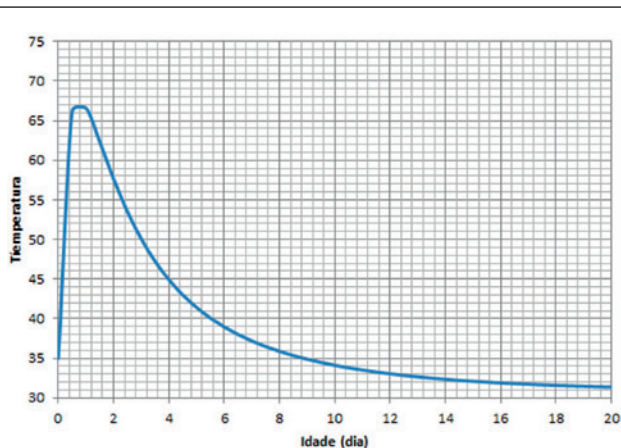
### ► Figura 4

Malha para propagação de calor em uma dimensão de 19 elementos finitos e 20 nós – blocos de altura aproximadamente 90 cm



► **Figura 5**  
Isoterma do bloco de 80 x 80 x 80 cm na idade em que ocorreu a temperatura máxima

o conhecimento das propriedades físicas, mecânicas e térmicas do concreto. Como resultado final, se tem a temperatura máxima e a probabilidade de fissuração. Na Figuras 5 e 6, é possível verificar a isoterma do protótipo na idade em que ocorreu essa máxima temperatura e a evolução da temperatura no bloco em campo, respectivamente. Para a comparação do modelo proposto pela pesquisa, avaliou-se a propagação de calor em uma dimensão para o estudo em campo, e duas dimensões para o estudo em protótipos.



► **Figura 6**  
Evolução da temperatura no bloco monitorado em campo

As malhas de elementos finitos utilizadas nas simulações estão mostradas nas Figuras 3 e 4.

O problema da condução térmica utilizado na modelagem do calor é baseado na resolução numérica da equação de propagação de calor em

um meio sólido (Equação 2), deduzida da Lei de Fourier para propagação de calor, e o princípio de conservação de energia. A equação constitutiva do fenômeno é mostrada a seguir:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = h^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\delta T}{\delta} \quad [2]$$

Onde:

$\delta_0$  = temperatura do elemento de volume considerado;

$\delta_t$  = variável tempo;

$z$  = coordenada na direção do fluxo;

$T$  = subida adiabática da temperatura no elemento de volume do concreto em questão;

$h^2$  = difusividade térmica.

O resultado do modelo matemático que rege o comportamento do concreto foi ajustado com base no trabalho de WU *et al.* (2011), no que se refere a determinação do tempo equivalente.

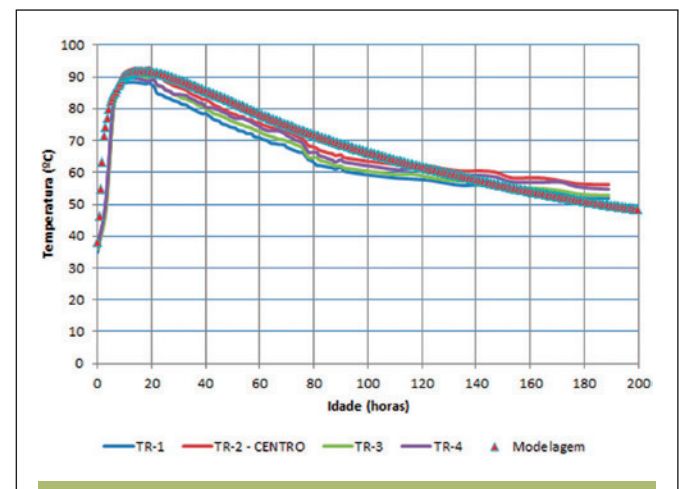
#### 4. MONITORAMENTO E RETROANÁLISE

As Figuras 7 e 8 mostram a boa aderência entre os resultados do monitoramento e a modelagem executada (TR – Temperatura real, em vários pontos).

#### 5. CONSIDERAÇÕES

Os modelos empregados se aderiram bem aos dados reais, que foram obtidos a partir das leituras de campo e nos protótipos, por meio de termopares.

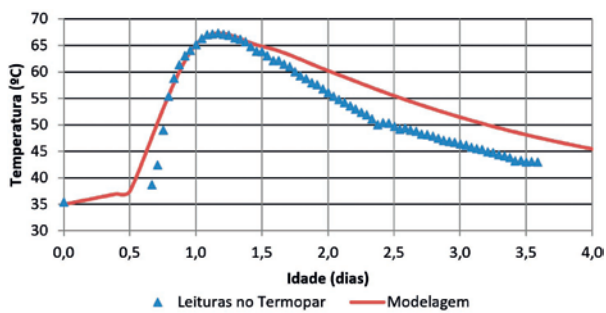
No campo foi observada fissura, conforme mostram as Figuras 9 e 10. Para uma análise mais detalhada internamente, foi extraído um testemunho



► **Figura 7**  
Evolução da temperatura medida em quatro pontos no interior de um bloco – Protótipo (bloco de 80 x 80 x 80 cm) localizado no estado do Paraná, comparado com a curva obtida a partir da modelagem

Fonte: Projeto de P&D Furnas/Aneel





► **Figura 8**  
Evolução da temperatura do bloco concretado em campo com o termopar instalado no centro para o monitoramento de temperatura e do modelo

de concreto sobre a fissura visando verificar a profundidade da mesma e a sua característica. Percebeu-se que a fissura estava presente ao longo de toda a profundidade, na camada recém-concretada e, internamente, apresentava-se com uma abertura maior que externamente. A fissura surgiu no dia seguinte à concretagem e existem algumas causas possíveis e ainda a serem melhor exploradas e investigadas. Uma hipótese está relacionada à alta temperatura atingida pelo concreto, na região central, trazendo um diferencial importante em relação à superfície, e outra, de movimentação das formas e/ou armaduras durante a concretagem, ou mesmo a combinação desses fatores. Ainda, de acordo com ACI 207 (2007), quando o gradiente de temperatura entre centro de gravidade da estrutura e a superfície for suficiente para



► **Figura 10**  
Detalhe interno do furo de extração e da fissura na superfície do bloco, observada em campo

ultrapassar a capacidade de deformação máxima do concreto, fissuras podem ser induzidas antes mesmo da estrutura atingir a sua máxima de temperatura, ou seja, antes que a temperatura do bloco esteja em processo de

estabilização com aquela do ambiente, após resfriamento.

As temperaturas atingidas nos dois blocos foram elevadas e ficaram acima de 65°C. Além das tensões elevadas de origem térmica, com conseqüente fissuração potencial do concreto, riscos de formação da etringita tardia (DEF) ao longo do tempo são elevadíssimos. Quanto ao bloco protótipo, ainda não foram observadas fissuras visualmente, no entanto, existe risco futuro de DEF e danos ao bloco, com reflexos no comportamento mecânico e incidência de deformação do concreto ao longo do tempo, por meio de um ataque interno por sulfatos em decorrência de alto calor interno atingido.

Comparando os consumos de cimento de 471 kg/m<sup>3</sup> com o cimento do tipo CP V-ARI e o de 315 kg/m<sup>3</sup> para o CP II F-40 com 10% de sílica ativa, como esperado, o concreto com maior consumo (protótipo) apresentou valores mais expressivos e maiores de temperatura máxima, chegando a 96°C no centro do bloco. Porém, o concreto contendo um consumo menor também atingiu temperaturas elevadas, chegando a 67,3°C, apesar de ter sido usado um cimento do tipo CP II-F em combinação com pozolana. Assim, cuidados devem ser tomados quanto às elevações de temperatura e aos riscos de fissuração de origem térmica no concreto, bem como o desenvolvimento da DEF no tempo. O fato de o protótipo não



► **Figura 9**  
Fissura ao longo de toda a extensão do testemunho de concreto, observada em campo

ter apresentado fissuração de origem térmica está relacionado ao cuidado no resfriamento lento ocorrido (houve a manutenção do isopor entre concreto e forma, sendo assim as taxas de resfriamento foram controladas e se mantiveram bem mais baixas), atingindo, portanto, menores gradientes de temperatura e uma dissipação mais lenta e gradual do calor interno, aliviando assim as tensões de origem térmica. Ainda, o protótipo foi desenvolvido em pesquisa com o intuito justamente de propiciar apenas a DEF (Hasparyk *et al.*, 2021), a partir de elevada temperatura de pico, porém, isolando as tensões de origem térmica e fissurações em decorrência dessas. Nesse caso, foi feito uso de um cimento com comportamento mais agressivo para o fenômeno da DEF (pelo tipo empregado, bem como as suas características físico-químicas), ocasionado pelas elevadas temperaturas




► **Figura 11**  
Detalhe da fissura no bloco, observada em campo

geradas em decorrência do seu calor de hidratação. Por outro lado, para o bloco concretado em campo, as definições do construtor não contemplaram a adoção de sistemas de refrigeração haja vista o emprego de um cimento do tipo CP II-F-40 e a incorporação de

10% de sílica ativa, o que não foi suficiente para manutenção de valores de temperatura abaixo de 65°C, trazendo além de potencial para a DEF, fissuras de origem térmica. Para ambas as situações, a prática recomendada seria a adoção de sistemas de refrige-

ração para garantir a temperatura de pico abaixo de 60-65°C.

### AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à FURNAS e ao LACTEC, e ao projeto de P&D FURNAS ANEEL. 

## ▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2007). Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete. ACI, Farmington Hills.
- [2] Equipe de FURNAS - Editor Walton Pacelli de Andrade (1997). Concretos: Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo - Ensaios e Propriedades. Ed. Pini, São Paulo-SP.
- [3] GAMBALE, P.G. (2017). Estudo do calor de hidratação do massa e contribuição ao cálculo térmico e à previsão de fissuras de retração. Tese Mestre em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil pela UFG, Goiânia.
- [4] HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.C.; BRONHOLO, J.L. et al. (2021). Concrete block sites in Brazil for assessing ASR, ISA and coupled attack over time. In: 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (16th ICAAR. 2020-2022), Ed. Batista, A.L.; Silva, A.S.; Fernandes, I.; Santos, L.O.; Custódio, J.C.; Serra, C. LNEC, Proceedings, v. 1, LNEC, Lisboa, Portugal.
- [5] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 2ª ed. HASPARYK, N. P. (Ed.). São Paulo: IBRACON, 2014.
- [6] GAMBALE, E. A. Avaliação da temperatura máxima em estruturas executadas com concreto massa. In: 57º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2015, Bonito-MS.
- [7] GAMBALE, P. G.; GAMBALE, E. A.; HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C.; Análises térmicas em blocos de concretos e avaliação da presença de DEF. In: 61º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2019, Fortaleza-CE.
- [8] WU, S. HUANG, D. LIN, F.B. (2011). Estimation of cracking risk of concrete at early age based on thermal stress analysis. J Therm Anal Calorim. Hungria. p. 171-186.
- [9] SCHOVANZ, F. D., TIECHER, F., HASPARYK, N. P., KUPERMAN, S., LERMEN, R. T. (2021). Evaluation of delayed ettringite formation through physical, mechanical, and microstructural assays. ACI Materials Journal/January 2021.

## Sistemas de Fôrmas para Edifícios

Recomendações para a melhoria da qualidade e da produtividade com redução de custos



**ANTONIO CARLOS ZORZI**

## SISTEMAS DE FÔRMAS PARA EDIFÍCIOS: RECOMENDAÇÕES PARA A MELHORIA DA QUALIDADE E DA PRODUTIVIDADE COM REDUÇÃO DE CUSTOS

Autor: Antonio Carlos Zorzi

O livro propõe diretrizes para a racionalização de sistemas de fôrmas empregados na execução de estruturas de concreto armado e que utilizam o molde em madeira

As propostas foram embasadas na vasta experiência do autor, diretor de engenharia da Cyrela, sendo retiradas de sua dissertação de mestrado sobre o tema.

### DADOS TÉCNICOS

ISBN 9788598576237  
Formato: 18,6 cm x 23,3 cm  
Páginas: 195  
Acabamento: Capa dura  
Ano da publicação: 2015

Patrocínio



Aquisição:  
[www.ibracon.org.br](http://www.ibracon.org.br)  
(Loja Virtual)