

CCR e sua contribuição para energia renovável sustentável – aplicação na UHE Serra do Facão

FLÁVIO MAMEDE PEREIRA GOMES – MSc., ENGENHEIRO CIVIL (fmppgomes@furnas.com.br); ALFREDO SANTOS LIDUÁRIO – MSc., ENGENHEIRO CIVIL (alfredo@furnas.com.br)
FURNAS

RESUMO

O CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR) UTILIZADO EM BARRAGENS DE GRAVIDADE TEM POR NATUREZA UM CONSUMO BAIXO DE CIMENTO QUE, DEPENDENDO DO NÍVEL DE RESISTÊNCIA, É PRÓXIMO DE 120 KG/M³. NA USINA HIDRELÉTRICA (UHE) SERRA DO FACÃO FOI POSSÍVEL APLICAR UM CONCRETO COM CONSUMO DE CIMENTO DE 70 KG/M³, TRAZENDO UM GANHO SIGNIFICATIVO EM TERMOS DE SUSTENTABILIDADE PELA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO₂ AO MEIO AMBIENTE. ESSA EFICIÊNCIA FOI ALCANÇADA PELAS BOAS PRÁTICAS DE TECNOLOGIA DO CONCRETO APLICADAS NA FORMULAÇÃO DA DOSAGEM E PELA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE CONTROLE E DE CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES REQUERIDAS EM PROJETO. ALÉM DA ALUSÃO AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, ESTE ARTIGO APRESENTA AS CARACTERÍSTICAS, ENSAIOS E PROPRIEDADES DO CCR APLICADO NESTA UHE.

PALAVRAS-CHAVE: BARRAGEM, CCR, CIMENTO, TEMPO DE VIBRAÇÃO, DMA.

1. INTRODUÇÃO

Enquanto, por um lado, o concreto é o material de construção mais utilizado no mundo pelo seu baixo custo, flexibilidade de uso, durabilidade e segurança (MEHTA; MONTEIRO, 2014), por outro, a indústria de cimento no mundo é responsável por cerca de 6% das emissões mundiais de carbono. Fundamental para o desenvolvimento das cidades, da mobilidade urbana e da expansão energética renovável, um esforço mundial é feito em prol da redução das emissões de carbono, conhecido como CSI (*Cement Sustainability Initiative, WBCSD, 2002*). Alinhado às melhores práticas internacionais, FURNAS desenvolveu durante a construção da Usina Hidrelétrica (UHE) Serra do Facão um concreto do tipo

CCR (concreto compactado com rolo) que propiciou redução significativa de custos e, principalmente, redução das emissões de carbono geradas pela construção da barragem, a ponto de ser ela a primeira obra de hidrelétrica certificada pela baixa emissão de carbono total.

Dentro desse contexto, este artigo apresenta as características, ensaios e propriedades de um CCR especial aplicado na UHE Serra do Facão, com baixo consumo de cimento, como contribuição à execução de uma grande obra de infraestrutura pautada em requisitos do desenvolvimento sustentável.

2. APRESENTAÇÃO DA UHE SERRA DO FACÃO E DADOS GERAIS DA OBRA

A Usina Hidrelétrica Serra do Facão (Figuras 1 e 2) possui 210 MW de potência e 81m de altura. Foi construída no Rio



FIGURA 1

VISÃO GERAL DO EMPREENDIMENTO: UHE SERRA DO FACÃO

FONTE: <https://revistaoe.com.br/usina-hidreletrica-serra-do-facao/>. ACESSADO EM 6/10/2022

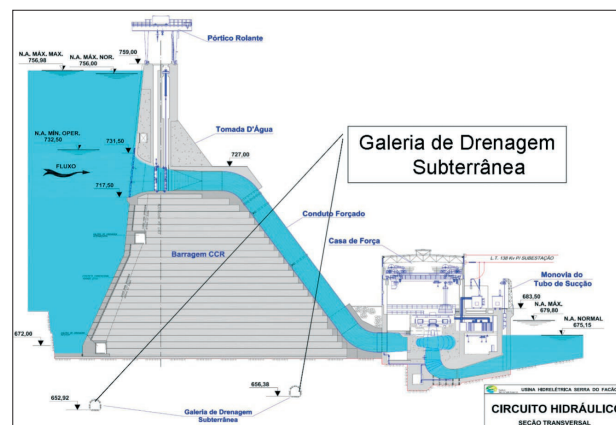


FIGURA 2

SEÇÃO TRANSVERSAL MOSTRANDO O CIRCUITO HIDRÁULICO DA UHE SERRA DO FACÃO

FONTE: <https://revistaoe.com.br/usina-hidreletrica-serra-do-facao/>. ACESSADO EM 6/10/2022



FIGURA 3
BARRAGEM DE CCR – UHE SERRA DO FACÃO

FONTE: FURNAS (RELATÓRIO INTERNO DCT.CCT.001.2008A)



FIGURA 4
BARRAGEM DE CCR E TÚNEL DE DESVIO

FONTE: FURNAS (RELATÓRIO INTERNO DCT.CCT.001.2008A)

São Marcos, em Goiás, entre os municípios de Catalão e Davinópolis. É uma barragem do tipo gravidade executada com CCR (Figuras 3 e 4). O CCR é um tipo de concreto comumente utilizado em barragens de gravidade, cuja principal característica é a forma de adensamento, em que é utilizado um rolo compactador vibratório para se obter o grau de compactação requerido em projeto. A energia de compactação, sendo muito mais elevada que nos adensamentos vibratórios normais, torna possível a utilização de uma quantidade de água muito menor que o concreto convencional. Portanto, é um concreto de aspecto seco/úmido (não plástico), capaz de ser adensado pelo peso de um rolo compactador sobre ele. Assim, é possível produzir concretos com reduzida quantidade de água e cimento, o que o torna um material econômico e viável para a utilização em barragens, sub-base ou mesmo a camada final de pavimentos. O grau de compactação, a resistência de projeto e a massa específica são os principais parâmetros de qualidade do material. Entretanto, ensaios especiais podem ser exigidos para se verificar o atendimento a condições específicas de projeto. Tal foi o caso dos ensaios realizados de módulo de elasticidade, permeabilidade por percolação de água, resistência à compressão e à tração em testemunhos extraídos, tanto de pista experimental de CCR em laboratório, quanto do concreto lançado em campo.

Dos 710.000 m³ de concreto da obra, aproximadamente 610.000 m³ foram de CCR. O consumo de cimento foi de apenas 70 kg/m³, dos quais apenas 40% (28 kg/m³) eram cimento propriamente dito (clínquer); o restante era adição de escória de alto-forno (em inglês *ground granulated blast furnace slag*, sigla GGBS ou GGBFS) é um subproduto da produção de ferro-gusa, cujo aproveitamento no concreto a partir de um processo simples de moagem (baixa necessidade de energia) insere-se no contexto do aproveitamento de rejeito, que reduz custos e impactos ambientais, tais como disposição em aterros. A adição de escória de alto-forno melhora ainda a durabilidade do concreto (quanto à penetração de cloretos, por exemplo) e controla a reatividade potencial álcali-agregado. O concreto com essas características reduziu a emissão de 41.000 ton CO₂ em relação

ao concreto convencional. A produção do concreto requer também consumo de água na mistura, que foi reduzida proporcionalmente à redução de consumo de cimento, da ordem de 1 milhão de litros. Por preocupação ambiental, e uma vez que as condições técnicas permitiram, foi eliminada a areia natural da dosagem, que seria obtida por meio de dragagem do rio, utilizando-se somente areia artificial a partir do agregado, contendo 14% de material pulverulento passante pela peneira #200 (0,075 mm).

3. CCR APLICADO NA BARRAGEM - CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES

Na Tabela 1, apresenta-se a composição do CCR empregado na UHE Serra do Facão. Na sequência, itens 3.1 e 3.2, são apresentadas as propriedades nos estados fresco e endurecido, bem como os

TABELA 1
COMPOSIÇÃO DO CCR – UHE SERRA DO FACÃO

Material	Composição (kg/m ³)	Material	Composição (kg/m ³)
Cimento CP III - 32	70	Brita 1	536
Água	130	Brita 2	665
Areia artificial	1234	Aditivos	Retardador e superplastificante (sais sulfonados e carboidratos)

FONTE: BRAGA E MARCHI (2012)

TABELA 2

CCR E SUAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO – UHE SERRA DO FACÃO

	Tempo de vibração (s)	Umidade (%)	Massa específica (kg/m³)	Grau de compactação (%)
Média	12,6	5,5	2607	99,7
Desvio-padrão	1,0	0,8	27,4	1
Coef. de variação (%)	8,2	14,0	1,1	1
Número de amostras	163	163	163	163

FONTE: BRAGA E MARCHI (2012)

ensaios de controle de qualidade, conforme a ABNT NBR 16312: 2015.

3.1 Propriedades no estado fresco

As principais propriedades do CCR no estado fresco estão organizadas na Tabela 2. Nos subitens 3.1.1 a 3.1.3, são tecidas considerações sobre os ensaios de caracterização e controle realizados com o CCR no estado fresco.

3.1.1 TEMPO DE VIBRAÇÃO E MASSA ESPECÍFICA – ABNT NBR 16312: 2015

O ensaio que mede a trabalhabilidade do CCR no estado fresco é o tempo de vibração com a utilização do consistômetro VeBê modificado. Este ensaio consiste em colocar o CCR no estado solto em um recipiente com peso e volume conhecidos, submetê-lo a uma vibração controlada em mesa vibratória e, assim, determinar o tempo para que a argamassa do concreto preencha os vazios na lateral do recipiente e aflore na superfície da amostra. Por este recipiente, após o ensaio de tempo de vibração, também é possível obter a massa específica do CCR compactado, também chamada de “massa unitária prática”. Os aditivos plastificante, retardador e superplastificante são comumente utilizados no CCR para se reduzir a água unitária do traço e, assim, reduzir proporcionalmente o consumo de cimento (FARIAS, 2006). O

efeito dos aditivos no CCR são os mesmos que no concreto convencional. O critério para se considerar uma trabalhabilidade adequada, em estudos de laboratório, é que o tempo de vibração esteja entre 10 s e 15 s. Em campo, pode ser admitido no local de lançamento até 35 s a 45 s, ou mais, desde que se atinja o grau de compactação. Acima desse tempo, as operações de adensamento requerem um número muito grande de passadas com o rolo compactador e tendem a não alcançar o grau de compactação desejado. Por outro lado, um tempo de vibração menor que 10 s implica risco de atolamento do rolo compactador. Na Figura 5, está apresentado o CCR durante o ensaio.

**FIGURA 5**

DISPOSIÇÃO DO CONSISTÔMETRO VeBê PARA O ENSAIO DE TEMPO DE VIBRAÇÃO

FONTE: FURNAS (RELATÓRIO INTERNO DCT.C.TC.028.2008b)

Essas propriedades no estado fresco (tempo de vibração e massa específica), além da umidade e grau de compactação, são apresentadas a seguir, na Tabela 2.

3.1.2 ENSAIO DE DMA – ABNT NBR 16312: 2015

Também foi realizado o ensaio para determinação da massa específica do CCR pelo aparelho DMA (dispositivo medidor de água), similar à massa específica teórica do CCR, ou seja, com grau de compactação 100%. O início do ensaio se dá com a determinação do volume da água de equilíbrio. O aparelho DMA é colocado sobre uma balança e, após zerada, o dispositivo é preenchido com água até o nível do sifão. A massa registrada na balança corresponde ao volume de água de equilíbrio. Com o sifão fechado, é adicionada uma massa de concreto (de aprox. $8,0 \pm 1$ kg) e, em seguida, a água de equilíbrio, que preenche os vazios do CCR com uma pequena agitação. A massa total do recipiente e as massas de CCR e de água são anotadas. Após breve repouso por 5 minutos, para sedimentar o material fino em suspensão, o excesso de água acima

do volume de equilíbrio corresponde ao volume de concreto da amostra sem vazios de ar aprisionado, que é medido pela balança abrindo-se o sifão para escoar o excesso de água. Conhecendo-se o valor da massa e do volume do concreto, tem-se a massa específica do material, atentando-se para seu significado de se correlacionar à massa específica teórica, ou seja, sem vazios de ar aprisionado. A Figura 6 ilustra e resume esse procedimento descrito.

A importância de se determinar de forma prática a massa específica teórica do CCR consiste na possibilidade de estimar a água unitária do traço. É possível estabelecer um gráfico com a correlação linear entre a massa específica e a água unitária da dosagem, para se determinar esta em função daquela medida pelo ensaio de DMA (ANDRADE, 2003).



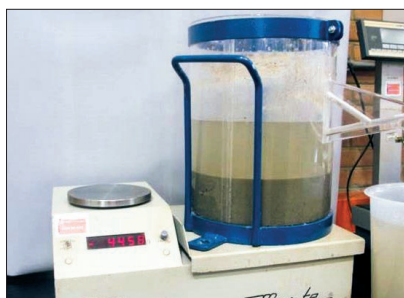
A



B



C



D

FIGURA 6

DISPOSITIVO DMA NA SEQUÊNCIA DE EXECUÇÃO: A) DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE EQUILÍBRIO; B) COLOCAÇÃO DA AMOSTRA DE CCR; C) PREENCHIMENTO COM A ÁGUA DO VOLUME DE EQUILÍBRIO; D) DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE ÁGUA COMPLEMENTAR AO CCR

FONTE: FURNAS (RELATÓRIO INTERNO DCT.C.TC.028.2008s)

3.1.3 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA E UMIDADE POR DENSÍMETRO NUCLEAR

A utilização de densímetro nuclear (Figura 7) para a determinação *in situ* da massa específica, água unitária e umidade do concreto lançado permite o controle de qualidade do processo de produção e execução com rapidez e confiabilidade, já que se trata de um método efetivo e confiável para controle do grau de compactação do CCR. Aperfeiçoado desde o final dos anos 50, tem sido comprovado, na prática, que ele é mais rápido que os métodos tradicionais (método da membrana plástica, etc), possibilitando economia em obra. Seu princípio de funcionamento consiste na emissão de uma fonte radio ativa de Césio 137, uma de Americio (Am 241) e uma de Belírio (Be). Estes raios são contados por um detector, após terem atravessado o material, sendo maior ou menor dependendo da densidade. Com isso, obtém-se correlação com o grau de compactação do concreto.

A Tabela 3 destaca os resultados *in situ* de massa específica, umidade e grau de compactação, empregando-se o densímetro nuclear, como forma de controle de qualidade da execução do CCR.

3.2 Propriedades no estado endurecido

A caracterização do CCR foi realizada previamente dentro do laboratório (Tabelas 1, 2 e 4) e confirmada depois a partir de testemunhos extraídos em campo (Tabela 5). Dessa forma, têm-se os resultados obtidos

em laboratório das propriedades do concreto no estado endurecido (Tabela 4), assim como os resultados oriundos dos testemunhos extraídos (Tabela 5).

É possível observar que as propriedades estudadas dos testemunhos retirados na UHE Serra do facão, na sua ordem de grandeza, estão condizentes com as determinadas em laboratório, conforme observadas nas Tabelas 4 e 5, principalmente, no âmbito da resistência à compressão. Ainda é possível observar que as medidas de massa específica *in situ* determinadas pelo controle da densidade (Tabela 3) apresentaram-se coerentes com as observadas nos testemunhos (Tabela 5). Os ensaios com o CCR endurecido atendem a propósitos específicos de projeto, sendo que os principais parâmetros para uma barragem de gravidade são a massa específica final, após a compactação, e a resistência à compressão. A resistência à tração é importante quando se avalia a integridade das juntas entre camadas, sendo que todo o processo construtivo é determinado a evitar a formação de junta (TRABOULSI, 2007). Por vezes, em caso de interrupção no lançamento contínuo de camadas, é necessário acrescentar uma argamassa de ligação para dar continuidade ao processo executivo. Tanto o intervalo de lançamento quanto o traço da argamassa de ligação são determinados experimentalmente por meio de pistas experimentais, em laboratório ou *in situ* (MARQUES FILHO, 2005).

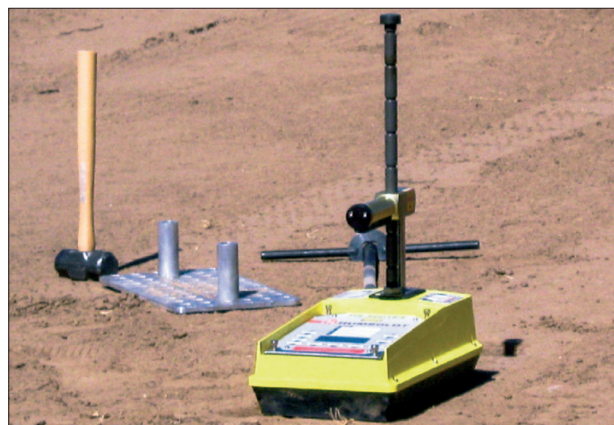


FIGURA 7

DENSÍMETRO NUCLEAR – MÉTODO PARA CONTROLE DO GRAU DE COMPACTAÇÃO DO CCR

FONTE: BRAGA E MARCHI (2012)

TABELA 3CONTROLE DA DENSIDADE *IN SITU* E GRAU DE COMPACTAÇÃO – UHE SERRA DO FACÃO

	Massa específica (kg/m³)	Grau de compactação (%)	Água (kg/m³)	Umidade (%)
Média	2630	99,4	147	6,1
Desvio-padrão	40	1,52	15,7	2,36
Coef. de variação (%)	1,52	1,53	10,7	39
Número de amostras	3960	3960	3960	3959

FONTE: BRAGA E MARCHI (2012)

TABELA 4

CCR E SUAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO – UHE SERRA DO FACÃO

Idade (dias)	7	28	91	182	364
Resistência média, f_{cj} (MPa)	4,3	9,1	12,7	13,9	14,8
Desvio-padrão (MPa)	1,0	1,6	1,7	2,1	2,4
Coef. de variação (%)	23,3	16,8	13,3	15,3	16,1
Número de amostras	159	163	163	162	155
Coefficiente t de Student	0,842	0,842	0,842	0,842	0,842
f_{ck} estimado (MPa)	3,4	7,8	11,2	12,1	12,8

FONTE: BRAGA E MARCHI (2012)

bono associadas às construções à base de cimento. As preocupações do concreto em geral são as mesmas do concreto compactado com rolo, a saber: a definição do traço a partir da quantidade de água para uma boa trabalhabilidade, a quantidade de cimento para se alcançar as propriedades requeridas em projeto, a otimização granulométrica dos agregados e a substituição de materiais por outros de menor impacto ambiental (uso de adições, fileres e areia artificial, dentre outros). Resta dizer que o nível de redução de cimento e de emissões de carbono, quando se utilizam todas as técnicas disponíveis, é bastante significativo. A preocupação com a sustentabilidade, ao lado da otimização dos custos, e a busca por segurança e qualidade por meio dos ensaios em laboratório, andam de mãos dadas. No presente estudo, só foi possível demonstrar a viabilidade técnica por meio de ensaios exaustivos com os materiais e concretos, o que levou a patamares bastante interessantes de consumo de cimento (28 kg/m³) e de emissões de carbono (41.000 ton CO₂ poupadas – redução de 65% das emissões totais). Extrapolando para futuros empreendimentos, com estes parâmetros econômicos e de sustentabilidade bem atendidos, é possível acessar financiamentos mais atraentes, os chamados *climate bonds*, e viabilizar inúmeros projetos antes inviáveis.

4. CONCLUSÕES

A engenharia de barragens foi bastante desenvolvida no Brasil desde a década de 70, mas contou também com grandes desenvolvimentos nas primeiras décadas

do século XXI, a partir do desenvolvimento de técnicas de dosagens e construtivas que permitiram a redução do consumo de cimento dos concretos e, por conseguinte, a redução significativa das emissões de car-

TABELA 5

RESUMO DAS PROPRIEDADES ESTUDADAS – TESTEMUNHOS DA ESTRUTURA DA UHE SERRA DO FACÃO

Ensaio	Dado	Furo							Total geral
		F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	
Massa específica (kg/m³)	$\bar{X}$	2634	2615	2630	2638	2644	2621	2578	2629
	Δ	42	42	69	30	72	86	53	60
	n	25	16	11	18	27	16	7	120
Resistência à compressão (MPa)	$\bar{X}$	11,7	12	11,8	11,8	14,3	12,6	16,1	12,7
	Δ	3,5	2,2	2,1	2,3	2,9	2,8	6,3	3,2
	n	15	10	4	8	13	8	4	62
Tração na compressão diametral (MPa)	$\bar{X}$	1,76	2,02	1,59	1,7	1,35	1,36	1,71	1,59
	Δ	0,39	0,26	0,33	0,18	0,49	0,55	0,83	0,47
	n	6	5	4	6	11	6	3	41
Módulo de elasticidade (GPa)	$\bar{X}$	21,6	24	21,7	22,7	39,6	33,6	28,3	29,5
	Δ	4,3	9,2	5,8	4,8	6,2	8,3	5,9	9,6
	n	6	5	4	8	13	8	4	48
Permeabilidade (m/s)	$\bar{X}$	—	—	$4,6 \cdot 10^{-12}$	$4,5 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-11}$	—	$1,3 \cdot 10^{-11}$
	Δ	—	—	—	$6,8 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$1,2 \cdot 10^{-12}$	—	$3,1 \cdot 10^{-11}$
	n	14	0	3	4	3	2	0	26

EM QUE: $\bar{X}$ = MÉDIA; Δ = DESVIO-PADRÃO; n = TAMANHO DA AMOSTRA (NÚMERO DE DETERMINAÇÕES INDIVIDUAIS) — FONTE: FURNAS (RELATÓRIO INTERNO DCT.C.TC.043.2009)

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Furnas Centrais Elétricas, aos colegas e amigos que atuaram na UHE Serra do Facão à época da construção: Paulo Fernando

Rodrigues, Maurice A. Traboulsi, José Francisco Farage do Nascimento, Moacir Alexandre de Souza Andrade e Newton Goulart Graça. Agradeço aos Camargo Correa, construtora da obra, em

especial ao consultor e amigo José Augusto Braga, *in memoriam*, não só pelos relevantes serviços prestados à engenharia nacional, mas pelas lições de amizade e ética, seus traços mais marcantes. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDRADE, W. P. Ageing and rehabilitation of concrete and masonry dams and appurtenant works. General Report, Question 82. CIGB, 2003.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16312 - Concreto compactado com rolo - Parte 3: Ensaio de laboratório em concreto. Rio de Janeiro, 2015.
- [3] BRAGA, J.A.; MARCHI, M. UHE Serra do Facão, Sustentabilidade e Engenharia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 54., Maceió, 2012. Anais... São Paulo: IBRACON, 2012.
- [4] FARIAS, L. A. Implementação do método de dosagem científica para o concreto compactado com rolo (CCR) de barragens. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás - UFG, Goiânia, 2006.
- [5] FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. UHE Serra do Facão - Relatório das Visitas Técnicas - Período de Outubro a Dezembro. Goiânia: Furnas, 2008a. \Relatório Interno de Furnas DCT.C.TC.001.2008\.
- [6] FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. UHE Serra do Facão - Caracterização do Concreto Convencional e CCR. Goiânia: Furnas, 2008b. \Relatório Interno de Furnas DCT.C.TC.028.2008\.
- [7] FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. UHE Serra do Facão - Caracterização de Propriedades de CCR por Testemunhos Extraídos. Goiânia: Furnas, 2009. \Relatório Interno de Furnas DCT.C.TC.043.2009\.
- [8] MARQUES FILHO, J. Maciços Experimentais de Laboratório de Concreto Compactado com Rolo Aplicado às Barragens. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2005. 278 p.
- [9] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 2ª ed. São Paulo: Pini, 2014. 752 p.
- [10] TRABOULSI, M. A. Análise do Comportamento de Juntas de CCR com Alto Teor de Finos. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2007.
- [11] WBCSD, 2002. CSI climate and energy workshop. In: <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/CSI-climate-and-energy-workshop>. Acesso em 06/10/2022

Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais

- **Autores** P. Kumar Mehta e Paulo J. M. Monteiro (Universidade da Califórnia em Berkeley)
- **Coordenadora da edição em português** Nicole Pagan Hasparyk (Eletrobras Furnas)
- **Editora** IBRACON • 4ª edição (inglês) • 2ª edição (português)

Guia atualizado e didático sobre as propriedades, comportamento e tecnologia do concreto, a quarta edição do livro "Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais" foi amplamente revisada para trazer os últimos avanços sobre a tecnologia do concreto e para proporcionar em profundidade detalhes científicos sobre este material estrutural mais amplamente utilizado. Cada capítulo é iniciado com uma apresentação geral de seu tema e é finalizado com um teste de conhecimento e um guia para leituras suplementares.

→ **Informações:** www.ibracon.org.br

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-21-3

Edição: 2ª edição

Formato: 18,6 x 23,3cm
P

Acabamento: Capa dura

Ano da publicação: 2014



Patrocínio

