

Grout enrichment of RCC for face of dams

Enriquecimento com calda do CCR para face de barragens

A. P. WENDLER ^a
apwendler@gmail.com

J. MARQUES FILHO ^b
jmarquesfilho@gmail.com

J. M. M. FRANCO FILHO ^c
joaquimmff@jmalucelli.com.br

M. BIANCHINI ^a
mauriciobianchini.mk@gmail.com

Abstract

The construction of RCC dams emphasizes the minimization of interferences, such as execution of the upstream face, to ensure productivity. The study sought to evaluate the physical properties of the grout enriched RCC, replacing the conventional concrete usually employed in the face, using the same materials, concrete core, labor and equipment used in construction of the Mauá Hydro Power Plant. Thus were made site experimental prisms (with different water / cement ratios and grout amounts) and subsequent core drilling, which were subjected to mechanical tests and permeability. The results showed that for grout water / cement ratio 0.74, the resulting material met the design specifications for cement consumption markedly lower (between 70 and 85% of the conventional concrete).

Keywords: dams, rolled compacted concrete (RCC), grout enrichment, permeability.

Resumo

A construção de barragens de CCR prioriza a minimização de interferências, como a execução da face de montante, para garantia da produtividade. O estudo procurou avaliar as propriedades físicas do CCR enriquecido com calda, em substituição ao concreto convencional usualmente empregado na face, utilizando os mesmos materiais, central de concreto, mão de obra e equipamentos, empregados na construção da Usina Hidrelétrica Mauá. Para tanto foram feitos prismas experimentais de campo (com diferentes relações água/cimento e quantidades de calda) e posterior extração de testemunhos, os quais foram submetidos a ensaios mecânicos e de permeabilidade. Os resultados mostraram que para relações água/cimento 0,74, o material resultante atendeu às especificações de projeto, para consumos de cimento notadamente menores (entre 70 e 85% do CCR).

Palavras-chave: barragens, concreto compactado com rolo (CCR), enriquecimento com calda, permeabilidade.

^a Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil;

^b Companhia Paranaense de Energia Elétrica, Curitiba, Brasil;

^c Construtora J. Malucelli, Barras, Brasil.

1. Introdução

No desenvolvimento de barragens de concreto tem-se o conceito de concreto massa, onde são considerados os efeitos das variações volumétricas da temperatura, da reação de hidratação do cimento, na dosagem e processo construtivo. A evolução desse para a técnica do CCR surgiu da necessidade natural em garantir a competitividade da solução em concreto para barragens, objetivando o incremento na velocidade de produção através da mecanização e redução de mão de obra por produto unitário, aliado a baixos consumos de cimento.

Logo, atividades periféricas à concretagem do maciço devem ser analisadas com cuidado, minimizando-se sua interferência na velocidade e automação do processo e garantindo as propriedades especificadas para o material. A execução da face de montante, a execução de juntas e a colocação de veda juntas, galerias e cortinas de drenagem são atividades que criam dificuldades no processo, podendo gerar caminhos críticos durante a construção [1]. Para otimização da colocação de CCR, aumentando o uso contínuo da central de mistura e diminuindo as interferências, há aproximadamente dez anos vem sendo utilizado comumente na China o método de colocação rampado com a aplicação de enriquecimento de calda na face de montante.

No método rampado, diminui-se a área de espalhamento e compactação, permitindo o lançamento de camadas discretas de pequeno volume constantemente. As camadas são colocadas com pequena inclinação com relação à horizontal de modo a permitir o acesso do rolo, podendo a superfície ser retomada para a próxima camada em um intervalo de tempo relativamente curto [2]. O tempo reduzido entre camadas sucessivas pode evitar a necessidade de utilização de argamassa de ligação, reconstituindo as condições básicas de barragens com concreto massa no que se refere às alturas entre camadas, com menor número de juntas frias, e com juntas de contração bem definidas [3].

Outra solução desenvolvida na China prevê a aplicação de pasta ou argamassa sobre o CCR e a posterior compactação por vibradores de imersão enriquecendo o concreto com pasta e argamassa. Este processo denominado de enriquecimento do CCR com argamassa, ou Grout Enrichment of RCC, tem sido aplicado para melhorar as condições de permeabilidade e de resistência mecânica das faces de montante ou em regiões onde o acabamento pode ser importante [4].

Nesta técnica é lançada uma quantidade limitada de calda de cimento junto ao CCR, calculada para garantir a obtenção de um material com alto grau de homogeneidade, espalhado na face de montante, sendo utilizados na seqüência vibradores convencionais para a compactação desta região [5]. O método tem como vantagem a diminuição da interferência na praça e a simplificação decorrente da utilização de um só tipo de mistura na mesma [6].

Apesar de ter sido executado em caráter experimental em FURNAS, em maciços experimentais de laboratório, e em parede lateral da galeria de drenagem da UHE Dona Francisca, no Rio Grande do Sul, as tentativas de adaptação do método construtivo com enriquecimento ainda não permitiram a obtenção de banco de dados conclusivo para sua aplicação em larga escala no Brasil. Trata-se de uma adaptação da técnica originada na China, país com características climáticas diferentes do Brasil e onde se utilizam misturas de CCR com maior teor cimentício, geralmente acima de 150 kg/m³ [4]. O estudo parte das hipóteses de que o material resultante, a partir do

enriquecimento do CCR, apresentará as mesmas propriedades físicas do concreto convencional de face. Também, de que o CCR empregado atualmente na construção de barragens no Brasil, com utilização de material cimentício entre 70 e 80 kg/m³ e aditivos plastificantes e retardadores de pega, em condições usuais de fundação e carregamento, apresenta um índice de vazios que possibilita a penetração da calda.

2. Programa experimental

2.1 Planejamento do experimento

Para a definição de todos os fatores envolvidos na pesquisa, foi necessário inicialmente avaliar as características desejáveis do material em teste, nesse caso para aplicação na face de barragens, bem como identificar as principais variabilidades envolvidas no processo.

O processo do CCR enriquecido apresenta as seguintes variabilidades:

- a) Variabilidades devido ao CCR
 - Alterações na mistura, verificadas durante o controle da obra;
 - Mudanças no teor de água ao longo do processo executivo;
 - Tempo de espera entre o espalhamento do CCR base e a aplicação da calda.
- b) Variabilidades devido ao adensamento
 - Tipo do vibrador;
 - Distância entre os pontos de inserção do vibrador;
 - Tempo de vibração no interior da massa.
- c) Variabilidades devido ao enriquecimento
 - Traço e trabalhabilidade da calda;
 - Quantidade de calda por metro linear aplicado;
 - Uniformidade de aplicação da calda.

Como fatores tipo resposta, adotaram-se a resistência mecânica e a permeabilidade, pois são parâmetros considerados no projeto de barragens devido a correlações que apresentam com a durabilidade e impermeabilidade do material, características desejáveis para a face de montante. Já os fatores controláveis escolhidos foram a quantidade de calda por metro linear e o traço da calda (representado pela relação água/cimento).

A Tabela 1 apresenta um resumo da matriz experimental utilizada, onde constam os principais fatores e seus níveis de controle. Logo, o modelo experimental proposto é do tipo fatorial cruzado com dois fatores controláveis, cuja utilização proporciona melhor economia e permite avaliar a interação dos fatores [7]. A equação abaixo representa o modelo estatístico escolhido.

Tabela 1 – Matriz experimental		
Fatores	Unidade	Valor
Quantidade de calda	l/m	15 / 17 / 19
Traço da calda (a/c)	–	0,74 / 0,8 / 0,9
Diâmetro do vibrador	mm	140
Tempo de vibração por ponto	s	15
Tempo entre colocação do CCR e aplicação da calda	h	1

Figura 1 – Detalhe do preparo da calda



Figura 3 – Enriquecimento do CCR - adensamento



$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

Onde:

μ = Média geral;

τ_i = Efeito do i-ésimo nível de A;

β_j = Efeito do j-ésimo nível de B;

$(\tau\beta)_{ij}$ = Efeito da interação AB;

ε_{ijk} = Erro aleatório.

2.2 Procedimentos

Inicialmente foram moldados dez prismas experimentais, nas dimensões (0,30 x 0,60 x 0,70) m, sendo nove constituídos por

combinações possíveis da calda e um executado em concreto convencional, como referência. Após, foram extraídos quatro testemunhos de cada prisma para a realização dos ensaios mecânicos e de permeabilidade.

O processo de enriquecimento compreendeu a colocação do CCR base nas formas, aplicação da calda e adensamento com vibrador de imersão. Antes da colocação do concreto as formas foram molhadas previamente a fim de evitar a perda precoce de umidade. A calda foi preparada (homogeneizada) em um tambor adaptado com pás misturadoras e torneira para coleta, e aplicada manualmente sobre o CCR não compactado com uso de balde graduado. Imediatamente após a introdução da calda, procedeu-se o adensamento com vibrador de acionamento pneumático, em dois pontos igualmente distribuídos na superfície.

As Figuras 1 a 4 mostram a seqüência do processo de enriquecimento e o aspecto final da superfície enriquecida, sendo a falta de

Figura 2 – Enriquecimento do CCR - aplicação da calda



Figura 4 – Aspecto superficial (a/c 0,74)



Table 2 - Concrete mixes

Misturas / materiais		Concreto	
		CCR	CVC face
Cimento	(kg/m ³)	75	195
Água	(kg/m ³)	125	190
Areia artificial	(kg/m ³)	1272	1144
Brita 25 mm	(kg/m ³)	619	1018
Brita 50 mm	(kg/m ³)	619	-
Relação a/c		1,67	0,97
Plastificante	(l/m ³)	0,9	1,32
Slump(mm)		-	70 ± 10
Vebê	(s)	15 ± 5	-
Ar incorporado	(%)	-	1,0 ± 0,5
Densidade teórica	(kg/m ³)	2710	2547
fck	(Mpa)	7	12
Idade de controle	(dias)	180	180
Confiança estatística	(%)	80	80
Dim. máxima característica	(mm)	50	25

homogeneidade mais perceptível quanto menor a relação água/cimento empregada na composição da calda.

A extração dos testemunhos foi realizada aos 53 dias de idade, sendo os mesmos posteriormente enviados ao Laboratório de Materiais e Estruturas, LAME, em Curitiba, para a realização dos ensaios previstos. Destaca-se que após desformados, os prismas apresentaram um padrão visual quanto à homogeneidade, havendo maior heterogeneidade à jusante, no fundo da peça e fora dos pontos de vibração, conforme Figura 5.

Os corpos de prova resultantes, com dimensões (10 x 20) cm, foram ensaiados à resistência à compressão conforme estabelecido pela NBR 5739 [8], e à resistência à tração por compressão diametral conforme descrito pela NBR 7222 [9]. Aqueles com dimensões (15 x 15) cm foram ensaiados à permeabilidade de acordo com a NBR 10786 [10], em equipamento similar ao desenvolvido pelo United States Bureau of Reclamation.

2.3 Materiais e dosagens

Para a realização do estudo optou-se pela utilização dos mesmos

materiais e dosagens empregados na construção da barragem de Mauá, devido à facilidade de obtenção e proximidade das condições reais de execução, obtendo resultados mais significativos.

A calda de cimento foi confeccionada com o cimento CPIV RS da Votorantim e aditivo retardador de pega PLASTIMENT VZ da Sika Brasil, nos traços definidos conforme programa experimental. A composição dos concretos pode ser visualizada na Tabela 2, destacando-se que ambos os traços utilizam areia artificial de agregado britado.

3. Resultados e análise

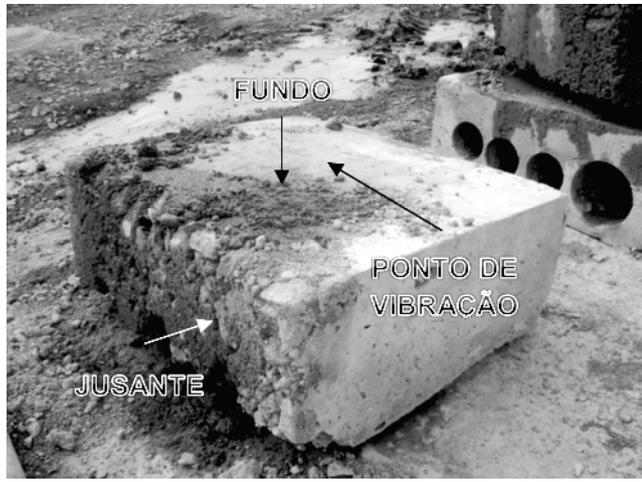
3.1 Ensaios de fluidez

No intervalo entre a fabricação do CCR e aplicação da calda, foram realizados ensaios de controle dos concretos no estado fresco e ensaio de fluidez das caldas empregadas. Essas foram submetidas ao ensaio do "Cone de Marsh", realizado conforme NBR 7682 [11], com o objetivo de verificar se atendem à fluidez que garanta a penetração no CCR.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de campo

Parâmetros	Prismas			
	10 (CCV)	1 / 2 / 3	4 / 5 / 6	7 / 8 / 9
Temp. ambiente (°C)	29,8	31	24,3	24,3
Slump (cm) / Vebê (s)	5,5	10	10	12
Temp. concreto (°C)	31	32,5	29,5	29,5
Relação a/c	-	0,74	0,8	0,9
Aditivo (%)	-	1	1	1
Fluidez (s)	-	6,7	6,1	5,7

Figura 5 – Aspecto dos prismas após desforma



Os resultados podem ser observados na Tabela 3, onde todas as caldas apresentaram índice de fluidez abaixo de sete segundos, para adição de apenas 1,0% de aditivo. Cabe ressaltar que houve uma alteração da relação água/cimento da primeira calda de 0,7 para 0,74, em virtude de dificuldades de penetração na massa. Essa foi testada com teores de aditivo de 1,0%, 1,2% e 1,6%, mas sem mudanças nos resultados de fluidez, os quais resultaram todos próximos e acima de sete segundos.

A fluidez insuficiente pode ser atribuída ao tipo de aditivo utilizado (retardador de pega) e seu comportamento em função da temperatura. Os ensaios da calda 0,7 foram realizados sob temperaturas elevadas, fora dos limites especificados para o estudo, acima de 30°C, sendo repetidos sob temperaturas menores durante a moldagem dos prismas 4 a 9. Os resultados indicaram fluidez de 7,1 segundos para calda sem aditivo e fluidez de 6,5 segundos para calda com 1,0% de aditivo, daí fixando em 7 segundos o índice de fluidez limite.

Figura 6 – Resultados de resistência à compressão

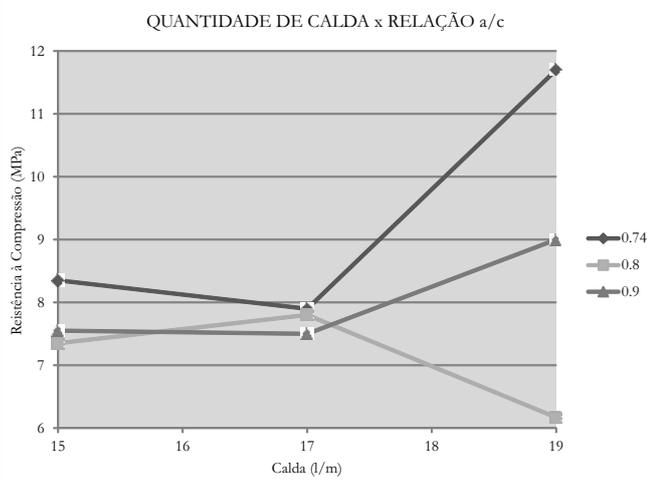
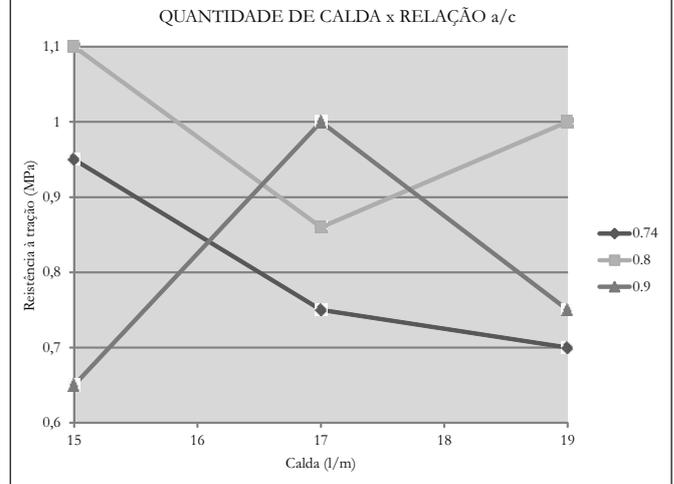


Figura 7 – Resultados de resistência à tração



3.2 CCR enriquecido

As Figuras 6 a 8 mostram os resultados dos ensaios de laboratório, segregados por parâmetro, em função da quantidade de calda por metro linear e traço da calda. Os dados de resistência mecânica e de permeabilidade referem-se a idades de controle de 70 dias e 60 dias, respectivamente.

Analisando as figuras, nota-se grande dispersividade nos valores de resistência e permeabilidade, aparentemente sem padrão definido. Não foram observadas falhas características do processo de adensamento, como a presença de vazios na massa do CCR enriquecido, atribuindo a dispersividade, de maneira geral, a variações na homogeneidade das misturas decorrente da falta de eficiência do aditivo escolhido.

Ainda assim, identificou-se um decréscimo na resistência à compressão passando-se da calda 0,74 para a calda 0,9, atingindo-se

Figura 8 – Resultados de permeabilidade

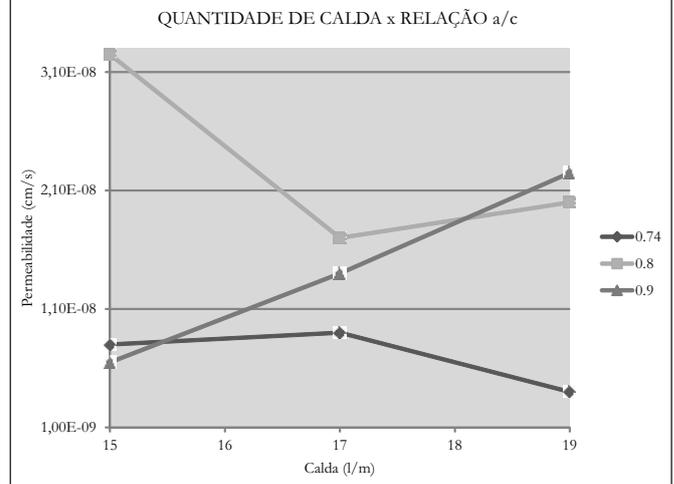
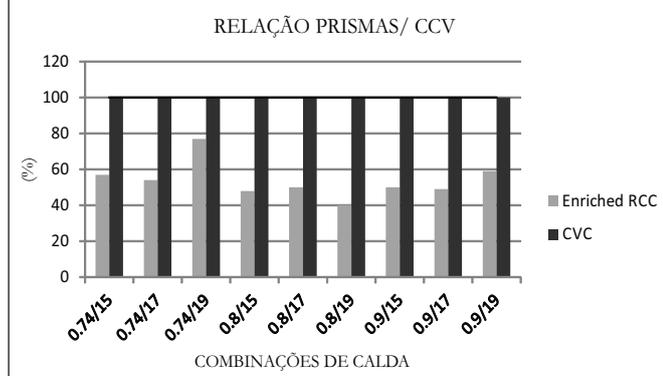


Figura 9 – Comparação com CCV de referência – compressão



o valor máximo com a combinação calda 0,74 e quantidade 19 l/m (11,63 MPa). Tal fato era esperado, pois segundo a Lei de Abrams a relação água/cimento e a resistência do concreto mantêm uma relação inversa e proporcional entre si [12].

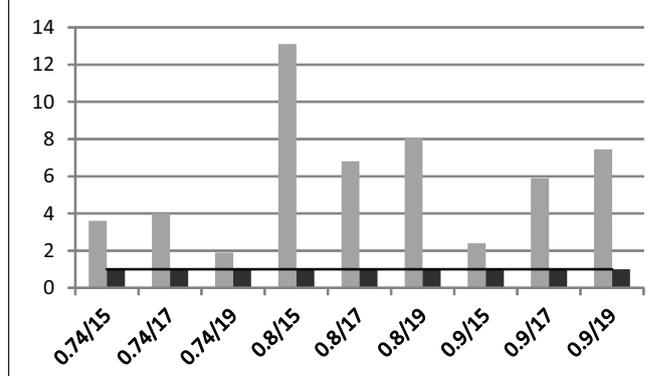
Ainda quanto à resistência à compressão, puderam-se verificar as variabilidades em cada tratamento e proceder à análise de variância conforme tabela ANOVA. Tanto o efeito dos fatores tomados isoladamente quanto o efeito da interação deles, foram considerados não significativos, para um intervalo de confiança de 95%. Já os resultados de tração por compressão diametral apresentaram disparidades maiores entre si provavelmente devido à natureza do ensaio, que fornece uma medida indireta da resistência e por isso está sujeito a maiores variabilidades.

As Figuras 9 e 10 apresentam um comparativo entre o CCR enriquecido e o CCV de face, onde se percebe claramente valores piores para o produto do enriquecimento. A resistência à compressão variou de 40 a 76% em relação ao CCV e a permeabilidade chegou a valores muito próximos, cerca de duas a quatro vezes o valor do concreto convencional, para a calda 0,74. O motivo principal é o fato de se estar trabalhando com consumos de cimento ligeiramente inferiores ao empregado no concreto convencional de face, entre 70 e 85%. Tal resultado era esperado e faz parte dos objetivos da pesquisa na tentativa de obtenção de traços mais econômicos.

4. Conclusões

- O aditivo empregado, com função de retardador de pega, apresentou problemas quanto à penetração da calda sob temperaturas elevadas, tornando seu efeito nulo quando aplicado em misturas acima de 30°C. Também, atribui-se ao tipo do aditivo a diversidade dos resultados de resistência mecânica e de permeabilidade, indicando incertezas quanto ao alcance da homogeneidade ideal com seu emprego. Assim, o estudo específico da dosagem das caldas com outros tipos de aditivos, teores e temperaturas, faz-se necessário para avaliar melhor o enriquecimento com calda do CCR. O presente estudo procurou utilizar os mesmos materiais da obra, por questões de simplicidade, não se atendo a esse aspecto.
- A fluidez necessária para a adequada penetração da calda no CCR base, do tipo alto teor de finos (ATF) e com consistência variando de 10 a 12 segundos (cannon time), deve situar-se

Figura 10 – Comparação com CCV de referência - permeabilidade



abaixo de 7 segundos conforme ensaio do “cone de Marsh”.

- A realização da pesquisa no canteiro de obras e a utilização dos mesmos materiais, equipamentos e mão de obra aplicados na barragem de Mauá levou a resultados bastante próximos das condições reais de execução, faltando, porém, análise quanto à produtividade do processo através da execução de aterros experimentais.
- Os limites estabelecidos para o processo de adensamento, utilizando vibrador com diâmetro de 140 mm e tempo de vibração de 15 segundos por ponto, mostraram-se bastante satisfatórios, pois não foram observadas falhas características do adensamento no interior da massa (vazios).
- Os resultados do CCR enriquecido mostraram-se inferiores ao CCV de referência, devido à utilização de consumos de cimento notadamente menores. Mesmo assim, a combinação calda 0,74 e 19 l/m atingiu 76% da resistência à compressão do concreto convencional, e praticamente o mesmo valor da resistência à compressão de projeto (12 MPa). Os valores de permeabilidade para a calda 0,74 variaram cerca de 2 a 4 vezes o valor do CCV, mas dentro das especificações de projeto para aquela obra (10-9 cm/s). Logo, o CCR enriquecido apresenta as mesmas propriedades do concreto convencional de face, tomando-se a permeabilidade como parâmetro decisivo, além de atender às especificações de projeto quanto à permeabilidade e resistência à compressão.

5. Agradecimentos

À Construtora J. Maluceli, que permitiu o desenvolvimento da pesquisa na UHE Mauá, disponibilizando todos os recursos necessários, em especial ao Eng. Joaquim Franco, pelas facilidades logísticas. À Tecdan, representada pelo Eng. Douglas Moser, pela participação no preparo e aplicação das caldas e pela disponibilidade dos dados de controle da obra. À equipe do LACTEC pela realização dos ensaios de laboratório em Curitiba e extração dos testemunhos no campo, e ao Eng. Plínio, pelos esclarecimentos iniciais.

6. Referências bibliográficas

- [01] RESENDE, F.D. Concreto compactado com rolo – Melhores práticas. Construtora Norberto Odebrecht SA, 2005.

- [02] BATISTA, E.L; GRAÇA, N.G; ANDRADE, W.P; SANTOS, F.C.R; MOREIRA, L.C. Execução de concreto compactado com rolo rampado em Lajeado – Consolidação da experiência. 44º Congresso brasileiro do concreto, Belo Horizonte, 2002.
- [03] MARQUES FILHO, J. Maciços Experimentais de Laboratório de Concreto Compactado com Rolo aplicado às Barragens. Tese de doutorado em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- [04] FORBES, B.A. Grout enriched RCC – A history and future. International water power & dam construction, 1999.
- [05] BATISTA, E.L; GRAÇA, N.G; BITTENCOURT, R.M; ANDRADE, W.P; GUIMARÃES, R.M; SANTOS, F.C.R. Estudos do concreto compactado com rolo para a face de barragens – ensaios executados in situ. 44º Congresso brasileiro do concreto, Belo Horizonte, 2002 a.
- [06] FORBES, B.A. RCC – New developments and innovations. 50º Congresso brasileiro do concreto, Salvador, 2008.
- [07] RIBEIRO, J.L.D; TEN CATEN, C. Projeto de experimentos. Curso de pós-graduação em engenharia civil, UFRGS, 2001.
- [08] ABNT. NBR 5739: Concreto – Ensaio de Resistência à Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.
- [09] ABNT. NBR 7222: Argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994.
- [10] ABNT. NBR 10786: Concreto endurecido – determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989.
- [11] ABNT. NBR 7682: Cimento - Calda de cimento para injeção - Determinação do índice de fluidez. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983.
- [12] MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: PINI, 2008.