



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH - 26
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

SIMULAÇÃO DE CCR EM LABORATÓRIO

José Marques Filho

Maurice Antoine Traboulsi

Vladimir Antonio Paulon

COPEL PARTICIPAÇÕES S.A.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S. A.

UNIVERSIDADE DE CAMPINAS

RESUMO

O Concreto Compactado com Rolo é uma técnica de execução de concreto utilizando intensivamente equipamento e minimizando o uso de mão de obra, gerando um processo eficiente e rápido. Os ensaios normalmente utilizados na caracterização e no controle de qualidade do concreto convencional não se aplicam ao CCR, nem tampouco ficam claras as correlações entre os ensaios usualmente empregados neste tipo de obras as reais condições de campo. Para diminuir o risco do processo e minimizar os custos de implantação, propõe-se a sistemática de execução de maciços experimentais em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE

CCR, Aterro Experimental, Laboratório, Ensaio, Parâmetros de Projeto.

1.0 - INTRODUÇÃO

O CCR –Concreto Compactado com Rolo é um processo executivo que procura aliar vocação do concreto na execução de estruturas hidráulicas, com a utilização intensiva de equipamentos de compactação, disseminados nas barragens de terra e de enrocamento, obras de terra e de pavimentação. Suas características principais são:

- Baixo consumo de mão-de-obra por volume unitário.
- Alta capacidade de colocação, diminuindo os tempos de execução em relação a outros processos construtivos de barragem de concreto, ou em relação a outro tipo de solução.
- Geração de processo industrial confiável, com melhoria de qualidade ao longo do tempo.
- Baixo consumo total de material em relação às soluções que utilizam materiais soltos, impactando menos no meio-ambiente.

O processo executivo impacta em todas as etapas construtivas, pois seus paradigmas de execução e controle são particulares e totalmente diferentes da prática usual dos concretos convencionais, bem como pode trazer aspectos a serem avaliados e monitorados ao longo da vida útil da obra. Com a característica de diminuir consideravelmente o tempo de execução de obra, com a utilização de equipamentos com grande disponibilidade no mercado mundial de engenharia civil, o CCR promoveu o retorno das soluções em concreto para os barramentos hidráulicos. Utilizado inicialmente de maneira tímida, pela desconfiança da ligação entre camadas ou pela imagem de um possível caminho de percolação entre as mesmas, o CCR foi tomando vulto no cenário técnico nacional, sendo utilizado em aproveitamentos de porte expressivo.

*Rua Coronel Dulcídio, 800 - CEP 80.420-170 - Curitiba - PR - BRASIL
Tel.: (041) 331-4400 - Fax: (041) 331-2656 - e-mail: jmarques@copel.com

Com a nova regulamentação do setor elétrico e com a demanda crescente por infraestrutura, abriu-se a porta a utilização cada vez mais intensa deste tipo de solução. O conhecimento do material e sua adequada utilização estão se consolidando, porém não existe ainda uma sedimentação dos diversos conceitos envolvidos, desde as condições de escolha de matéria-prima, definição da central de britagem, dosagem, controle da qualidade de materiais e execução.

A adoção de qualquer tipo de solução para um aproveitamento hidrelétrico depende do reconhecimento e da gestão dos riscos de engenharia, de modo a se obter diretrizes para as análises de segurança e garantir a sua financiabilidade. Com a disseminação do processo de contratação de empresas *EPC (engineering, procurement and contractor)* sob o regime usualmente conhecido como *turnkey*, com preço fechado e com responsabilidades definidas, os fornecedores de bens e serviços tiveram aumentada a necessidade de avaliação precisa dos riscos de construção e desempenho, e das suas conseqüentes influências nos custos.

Este trabalho apresentará uma forma de avaliação prévia dos parâmetros para caracterização física de CCR, de modo a minimizar os riscos iniciais do projeto e otimizar as dosagens iniciais do campo, minimizando o custo dos primeiros lançamentos de material. O processo aplica o conceito de maciços experimentais executados em laboratório, utilizando o equipamento para compactação em laboratório existente no Laboratório de Concreto de FURNAS, em Goiânia, no estado de Goiás. Para ilustrar a validade do método, será apresentada comparação dos resultados da simulação em laboratório com aqueles obtidos da construção da Usina Hidrelétrica Dona Francisca, localizada no Rio Grande do Sul (7) (8).

2.0 - A TÉCNICA DO CCR

A evolução do conceito de concreto massa para a proposição do CCR foi conseqüência natural da necessidade de tornar competitivas as soluções em concreto para barragens de aproveitamentos hidráulicos. O raciocínio básico focou-se no incremento da velocidade de produção através da mecanização e diminuição da mão-de-obra por produto unitário, aliada à conceituação de baixos consumos de cimento. Identicamente ao caso de utilização de concreto massa, as preocupações se concentram na permeabilidade e parâmetros de resistência do material que comporá a estrutura civil.

A execução do concreto compactado com rolo aplica os processos executivos usualmente utilizados em obras de terra, durante as fases de colocação (com espalhamento) e compactação. A Figura 1 mostra os principais passos da execução de uma obra de CCR e suas diversas frentes de trabalho. Nela está mostrado um dos possíveis esquemas construtivos utilizados normalmente, onde:

- Transporte: executado por caminhões basculantes. Outra possibilidade muito empregada é a utilização intensiva de correias transportadoras.
- Espalhamento: utilizando tratores de esteiras cujas lâminas colocam o concreto na posição final e acertam a espessura para compactação.
- Compactação: utilizando rolos compactadores vibratórios. Formas das faces de montante e jusante executadas na solução temporariamente fixas e manuseadas por empilhadeiras ou guindastes leves.
- Execução dos paramentos de montante e jusante em concreto convencional.



FIGURA 1 Vista Geral de uma Praça de CCR (Salto Caxias, estado do Paraná)

Em barragens convencionais, as juntas horizontais sempre representaram grande preocupação dos engenheiros, tanto pela possibilidade de criação de caminho preferencial de percolação, como pelas atividades executivas que garantissem uma adequada ligação entre as camadas de lançamento, e, conseqüentemente, a envoltória de resistência necessária às solicitações estruturais. Enquanto barragens utilizando concreto massa tinham camadas cuja espessura variava em geral entre 1,5 m e 2,5 m, o método construtivo utilizando o CCR impunha valores entre 0,25 e 0,50 m, aumentando consideravelmente a quantidade de juntas horizontais ao longo de toda a barragem (1) (3). Desde o início do desenvolvimento do material os engenheiros apresentaram várias dúvidas sobre o comportamento desse material, geradas por sua consistência mais seca do que os concretos convencionais, sob o ponto de vista de projeto, execução e performance das obras. As resistências iniciais ao emprego do material se originaram na dúvida não procedente sobre este se tratar realmente de concreto e não de um enrocamento enriquecido, e estenderam-se à desconfiança de sua estabilidade no decorrer das décadas sob a ação da água (2) (3). As principais dúvidas surgidas durante o desenvolvimento de barragens de CCR são apresentadas a seguir:

- Que parâmetros de resistência o material apresenta.
- Qual a envoltória de resistência é apresentada na interface entre camadas (ligação entre as mesmas).
- As juntas podem gerar caminhos preferenciais de percolação.
- Como se obtém a impermeabilidade, ou se controla a permeabilidade da estrutura.
- Qual a possibilidade da consistência seca necessária causar dificuldades de adensamento que levem a porosidades e/ou permeabilidades inadequadas à responsabilidade da estrutura, podendo comprometer sua durabilidade.
- A velocidade de construção muda a conceituação e os cuidados do projeto.
- Qual a compatibilidade de deformação entre os diferentes materiais.
- Como evitar que as obras obrigatórias, como galerias, drenagem, vedajuntas interfiram na automação e velocidade do processo.

A resposta a estas questões foi sendo procurada na execução de maciços experimentais no campo, desenvolvimento de ensaios em laboratório e análise de ensaios realizados quando da execução dos diversos protótipos e de seu desempenho durante a operação.

3.0 - OBTENÇÃO DE PARÂMETROS

A necessidade de adaptação aos materiais disponíveis no local da obra faz com que cada empreendimento específico seja único, e as influências do clima local e suas variações ao longo do tempo têm influência significativa nas dosagens, controle da qualidade e acertos de centrais na obra. Como a trabalhabilidade e volume de produção dependem da obtenção de um material mais seco que os concretos convencionais que permita a utilização de rolo vibratório com eficiência, tem-se consumos de água muito baixos, e como conseqüência, seu controle em todas as fases do processo acaba determinando a qualidade final da obra. Além dos estudos da influência da variação dos consumos de água se aliam as dificuldades de parametrização das envoltórias de resistência entre camadas, as soluções de impermeabilização da face de montante, o controle da central de concreto no tempo, os fenômenos térmicos, a fluência e a obtenção de dados adequados de projeto. As dificuldades de obtenção de parâmetros de projeto e de tomada de decisão construtiva são aumentadas pela grande influência da forma do agregado, da superfície específica do filer obtido, do cimento e suas adições, as quais têm características locais, dependendo da petrografia das rochas existentes e dos demais materiais disponíveis. Também são muito importantes os tipos de equipamentos de compactação disponíveis, o treinamento da mão-de-obra e o desenvolvimento de sistema de garantia da qualidade adequado.

Todos os fatores mencionados devem ser ponderados durante o processo de escolha da solução a ser adotada para empreendimentos hidráulicos e os estudos de dosagem devem procurar levá-los em conta, prevendo os parâmetros necessários à trabalhabilidade, segurança, durabilidade, manutenção e ao correto desempenho da estrutura durante sua vida útil. Estes fatores têm sua influência analisada durante os ensaios laboratoriais para determinação da dosagem, e durante a execução de maciços experimentais no campo que permitam o ajuste de traços e da central de concreto, bem como definem os parâmetros necessários ao término do projeto. Além da complexidade do processo gerada pela multiplicidade de variáveis envolvidas, está presente a dificuldade de adaptabilidade dos ensaios convencionais de concreto à realidade do campo em uma obra de CCR.

4.0 - MACIÇOS EXPERIMENTAIS

A execução de maciços experimentais no campo é de fundamental importância para verificação da adaptabilidade dos processos previstos na dosagem e nos estudos de laboratório. Neste tipo de ensaio, são testados as condições e procedimentos executivos reais, utilizando os equipamentos, materiais, centrais de produção e mão-de-obra que efetivamente desenvolverão o empreendimento. Para serem efetivos, os maciços experimentais devem ser executados preferencialmente após as centrais de britagem e de concreto estarem aferidas, e devem permitir que ensaios do concreto resultante possam ser executados para comparar com os obtidos com os de corpos-de-prova moldados. Como o CCR pode apresentar pequenas resistências nas primeiras idades, a obtenção de testemunhos só é possível em idades avançadas, o que pressiona o cronograma de execução da obra.

A execução de maciços experimentais na obra em época muito posterior aos estudos de dosagem gera insegurança inicial sobre o processo e dificulta o processo de otimização e a confiança no dimensionamento das peças. Uma alternativa para o processo seria a execução de maciços experimentais em laboratório com a finalidade de simular as condições de execução no campo. A técnica foi inicialmente tentada no Japão, com a criação de simulador de compactação, hoje desativado. O Laboratório de FURNAS, em Goiânia, inaugurou laboratório para execução de corpos-de-prova compactados, com possibilidade de variação da frequência e energia de vibração do rolo, e velocidade de percurso (4) (5) (6). O equipamento, totalmente informatizado, monitora a compactação da camada e permite a visualização em tempo real das condições de execução do maciço. As Figuras 2 e 3 mostram detalhes do equipamento.



FIGURA 2 Vista Geral do Equipamento para Compactação de CCR em Laboratório



FIGURA 2 Equipamento em funcionamento

As vantagens de utilização deste tipo de simulação podem ser elencadas:

- Verificação do grau de compactação potencial das misturas.
- Avaliação da capacidade de compactação com equipamentos convencionais.
- Avaliação de vários tipos de mistura, podendo ser variada a granulometria, teor de material cimentícios e finos, utilização de aditivos entre outros.
- Simulação da execução das faces impermeáveis, ou do acabamento das faces.
- Simulação das condições de ligação entre camadas, podendo se variar tempo entre camadas sucessivas, bem como simular condições ambientais diversas.
- Avaliação do potencial de resistência, de envoltórias de resistência entre camadas e de outros parâmetros físicos de interesse.
- A obtenção de testemunhos para os diversos ensaios é mais simples que em condições de campo, podendo ser executados, também, ensaios de cisalhamento direto na superfície entre camadas.
- Controle das condições de cura

Os ensaios em pista experimental em laboratório podem ser utilizados para otimizar as misturas sob diversas condições, e determinar potencialmente os diversos parâmetros físicos de interesse. A execução de ensaios convencionais em corpos-de-prova moldados e sua comparação com os dados obtidos dos corpos-de-prova compactados com rolo permitem a obtenção de correlações confiáveis e valiosas para o controle da qualidade no campo e aferição das centrais e das misturas. A capacidade de controle do tempo no processo, com medidas das variações dos teores de água, cria condições para simular correções que serão requeridas durante a execução real da obra. Este ensaio permite um alívio no cronograma de ensaios, fornecendo uma análise inicial mais precisa, auxiliando a tomada de decisão já na fase de montagem do canteiro industrial da obra e na organização geral do processo construtivo. Correções de granulometria e da quantidade de finos podem ser simuladas através da britagem e peneiramento feito em laboratório, que é possível pelas quantidades relativamente pequenas que são usadas nos corpos-de-prova.

Além de auxílio à decisão em obras correntes, este tipo de ensaio abre um campo imenso nas pesquisas utilizando CCR, onde podem ser estudadas as influências de cada componente da mistura e das variações dos processos construtivos, além de permitir a simulação de misturas com agregados com as mais variadas petrografias.

Apesar das pistas experimentais criarem condições que permitam várias simulações das condições de campo, é claro que não é possível a modelagem real dos diversos equipamentos, nem de sua variabilidade e mudanças causadas pelo uso durante a vida útil. Mesmo assim, as pistas experimentais em laboratório criam condições para a obtenção do grau de compactação adequado da mistura e de dados precisos sobre as propriedades mecânicas potenciais do material.

A execução de pistas em laboratório não exclui a necessidade de maciços experimentais no campo, com as condições exatas de início de obra, ou muito próximo destas. Os maciços de campo têm como características importantes:

- Verificação da adaptabilidade dos equipamentos de campo às condições preconizadas nos ensaios de laboratório.
- Avaliação dos processos de controle da qualidade e sua eficiência em condições reais do campo.
- Simulação em real grandeza dos processos que interferem na produtividade industrial, com a execução de faces, colocação de pré-moldados, interfaces com concretos convencionais e chumbadores, avaliação da influência do leito rochoso, entre outros.
- Avaliação de perdas de consistência e teor de água entre a mistura e a colocação.
- Calibragem dos tempos de execução de cada etapa do processo.
- Treinamento das equipes de forma a minimizar os efeitos do noviciado nos primeiros lançamentos. Esta é uma das vantagens mais importantes da pista, pois evita surpresas nas regiões mais solicitadas da estrutura, e fornece um balizamento para correções de procedimentos ou de treinamento das equipes, de modo a minimizar a probabilidade de não conformidades no início da obra.
- O treinamento, aliado ao controle e correção de processos, leva a minimização do índice de variação dos parâmetros controlados no início de obra.

- Obtenção de dados em testemunhos para calibrar os ensaios em corpos-de-prova moldados, complementando os ensaios e correlações obtidos durante os processo de dosagem e de execução de pista em laboratório.

5.0 - ESQUEMA GERAL PROPOSTO

Como a taxa diária de colocação do concreto compactado com rolo é expressiva, decisões sem o conhecimento prévio do material perante as possíveis variabilidades do processo levam a soluções conservadoras já que qualquer não-conformidade passa a ter conseqüências catastróficas. Para minimizar a utilização excessiva de aglomerante, com as vantagens de custo e diminuição dos efeitos termogênicos da hidratação do cimento, propõe-se processo de definição de dosagem com a seguinte seqüência:

- Prospecção no campo das áreas fornecedoras dos agregados.
- Execução de ensaios de dosagem, variando a granulometria dos agregados.
- Execução de maciços experimentais para otimização dos parâmetros e das condições de compactação, gerando uma otimização das dosagens elencadas. Estes maciços permitem a obtenção de testemunhos, cujos ensaios fornecem dados mais apurados para servirem de base ao projeto da estrutura.
- Execução de maciços experimentais no campo para avaliação dos processos construtivos e treinamento de mão-de-obra. Podendo gerar alguma alteração das dosagens para melhorar as condições de colocação e adensamento.
- Obtenção de testemunhos do aterro experimental, para outra rodada de otimização das dosagens
- Otimização da dosagem utilizando os resultados do campo
- Geração de bateria de ensaios em testemunhos para validação e consolidação dos resultados

Deste modo, é possível uma primeira otimização das dosagens antes do início dos lançamentos no protótipo, gerando considerável economia. Como vantagem adicional, os maciços no laboratório permitem a obtenção de parâmetros de projeto que diminuem as incertezas durante a fase de projeto, dando maior conforto à tomada de decisão, permitindo uma melhor avaliação da matriz de risco. A facilidade de manuseio dos maciços experimentais possibilita a avaliação dos parâmetros físicos das juntas entre camadas, que, por falta de dados confiáveis, gerou as principais dúvidas no início do desenvolvimento da técnica.

6.0 - VALIDAÇÃO DO PROCESSO

Para validação da simulação de CCR em laboratório, foi executado programa experimental reproduzindo as condições de campo em laboratório, com o objetivo comparar resultados de testemunhos obtidos do protótipo com aqueles obtidos de maciços experimentais executados em laboratório. Para tal, utilizando-se os mesmos componentes disponíveis durante a execução da obra, adotou-se uma das dosagens aplicadas na barragem (7) (8) para efeito do estudo, adotando como parâmetros de comparação a massa específica e a resistência à compressão diametral na idade de 180 dias. A Tabela 1 apresenta o traço do concreto utilizado no estudo.

TABELA 1 Traço utilizado para a confecção das pista.

MATERIAL	CONSUMO
Cimento	90 kg/m
Água	143 kg/m ³
Areia	1083 kg/m ³
Brita1	679 kg/m ³
Brita2	553 kg/m ³
Aditivo (Master mix 282R) – MBT	1,08 kg/m ³
Cannon Time	20s a 30s
Grau de compactação	≥ 98%

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos de ensaios em testemunhos para os parâmetros de controle escolhidos. Observa-se, que tanto para a massa específica, quanto para a resistência à compressão diametral os resultados são similares, mostrando que a simulação em laboratório foi adequada.

TABELA 2 Comparação de resultados obra x maciços experimentais

PARÂMETRO	OBRA	MACIÇOS EXPERIMENTAIS
Massa Específica Média Coeficiente de Variação	2.535 kg/m ³ 1,3 %	2.517 kg/m ³ 1,3 %
Resistência à Compressão 180d Média Coeficiente de Variação	7,9 MPa 28 %	7,8 MPa 16 %

7.0 - CONCLUSÃO

Com a reprodução em laboratório das condições do campo, conclui-se que a execução de maciços experimentais em laboratório se constitui em uma ferramenta importante para a previsão de parâmetros do concreto compactado com rolo, auxiliando no processo de dosagem e de otimização do consumo de cimento, da granulometria, e conseqüentemente dos custos, sem prejuízo da segurança e da durabilidade da obra. Os maciços de laboratório permitem a avaliação dos diversos fatores que interferem nos parâmetros de resistência do concreto que seriam de difícil execução no campo, permitindo uma confiabilidade maior dos processos executivos. Abre-se a possibilidade de avaliar previamente a influência de cada fator controlável nas propriedades do CCR, minimizando os riscos da adoção deste tipo de solução. Cria-se a possibilidade de diminuição responsável de custos desde o início da implantação da barragem para geração hidráulica, além de diminuir a percepção de risco em todos os envolvidos no processo de financiamento do empreendimento.

A adoção de uma fase de estudos em maciços experimentais em laboratório no processo de decisão aumenta o conforto em todas as fases de desenvolvimento do empreendimento. Geram-se condições para a utilização de parâmetros de projetos confiáveis, e há uma avaliação prévia dos processos construtivos, podendo otimizar as facilidades industriais de obtenção dos agregados e mistura. Os dados obtidos na seqüência sugerida criam condições de otimizações da mistura do CCR desde o início da obra, e geram um banco de dados que servirá de guia à operação e manutenção do empreendimento, bem como servirá de guia para novos projetos.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo - Ensaio e Propriedades" -Equipe de FURNAS - Laboratório de Concreto, ed. PINI-S.Paulo, 1997
- (2) ANDRADE, W. P. de; ANDRIOLO, F. R., -"Dosagem do CCR: Alta Pasta?; RCD?: Pobre? Ou Adequado Teor de Finos", anais-III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba-1998
- (3) ANDRIOLO, F. R., -"The Use of Roller Compacted Concrete" -Oficina de Textos, São Paulo-1998
- (4) MARQUES FILHO J.; ANDRADE, W. P. de; STEFFEN, R. D.; MARINO, M. A.; LEVIS, P., -"Execução de Aterros Experimentais de CCR em Laboratório, Programa de Ensaio", anais, -III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba-1998
- (5) GALLEGOS, A. R.; GONÇALVES JR, J. A.; SOUZA, M. A. de; GÓZ, R. S.; BITTENCOURT, R. M.; ANDRADE, W. P. de, -"Equipamentos para Executar Pista Experimental de Concreto Compactado Com Rolo em Laboratório", anais, -III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba-1998
- (6) GALLEGOS, A.R.; GONÇALVES JUNIOR, J., ANDRADE, M. A. S. de; GÓZ, R. S.; BITTENCOURT, R. M.; ANDRADE, W. P. de-"Equipamento para produção de pista experimental de concreto compactado com rolo em laboratório", anais 41ª REUNIÃO ANUAL do IBRACON-Salvador 1999.
- (7) MOSER, D.; STEFFEN, R. D.; CESCO, R. J.; FERRREIRA, W. S.; GARCIA A. de J., -"Controle da Qualidade do Concreto CCV e CCR da UHE Dona Francisca", anais 43ª REUNIÃO ANUAL do IBRACON, Foz do Iguaçu, 2001
- (8) MOSER, D. E.; STEFFEN, R. D.; BRITO, C.; MUSSI, J. M. P. - "Quality control RCC of Dona Francisca Dam", Proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete, Madrid, Spain, 2003