



SIMPÓSIO

DE OBRAS EM CONCRETO
COMPACTADO COM ROLO

SÃO PAULO, 25 E 26 DE ABRIL DE 1995

Aplicação, Ensaio e Pesquisas do
Concreto Compactado a Rolo na Itaipu
Binacional

I SIMPÓSIO DE OBRAS EM CONCRETO COMPACTADO A ROLO

SÃO PAULO

ABRIL 1995

APLICAÇÃO, ENSAIOS E PESQUISAS DO CONCRETO

COMPACTADO A ROLO NA ITAIPU BINACIONAL

FRANCILINO FERNANDES NETTO
IDEVAL BETIOLI
JOSÉ DOMINGO CARRERA DUARTE
LUIZ CÉSAR ROSÁRIO
JOSÉ AUGUSTO BRAGA
SÉRGIO NOGUEIRA DE SÁ
SÉRGIO ABU-JAMRA MISAEL
FRANCISCO RODRIGUES ANDRIOLO

RESUMO

O Laboratório de Concreto da ITAIPU Binacional vem, desde 1.976, dosando, ensaiando e pesquisando concreto compactado a rolo (CCR), tanto para a própria Entidade, como para outros empreendimentos no Brasil e no exterior (Argentina e Angola).

Este trabalho resume, compara e comenta dados obtidos nestas pesquisas e ensaios, assim como relata a experiência de campo adquirida com a aplicação deste tipo de concreto nas obras de ITAIPU.

São feitos comentários a respeito das modificações e/ou adaptações introduzidas nos procedimentos de métodos padronizados para possibilitar a realização de ensaios com este novo tipo de material.

Relata-se ainda, algumas pesquisas realizadas para avaliar novos conceitos introduzidos na dosagem do CCR como, por exemplo, a utilização de "finos" provenientes da britagem dos agregados, bem como avaliação desse material com relação ao seu efeito de pozolanicidade.

Finalmente, o trabalho enfoca a realização de estudos atuais e futuros visando o desenvolvimento do uso de novos produtos, como a microsilica e aditivos a base de enzimas, para melhorar a resistência e permeabilidade do CCR.

1 - INTRODUÇÃO

Em 1976, quando ainda da implantação do canteiro industrial em Itaipu, a equipe técnica da Entidade já vislumbrava a grande possibilidade de êxito da aplicação do concreto compactado a rolo (CCR) em estruturas onde, tradicionalmente, se utilizaria o concreto massa. Tanto é que a primeira tentativa de desenvolvimento da tecnologia desse tipo de concreto ocorreu em abril daquele ano quando um concreto, com características semelhantes as do CCR, foi utilizado como contrapiso de galpões dos almoxarifados (foto 1). Em uso até hoje, encontra-se em perfeitas condições. Tendo em vista a falta de estrutura para ensaios de controle na época, infelizmente nenhum dado referente àquele concreto ficou registrado.

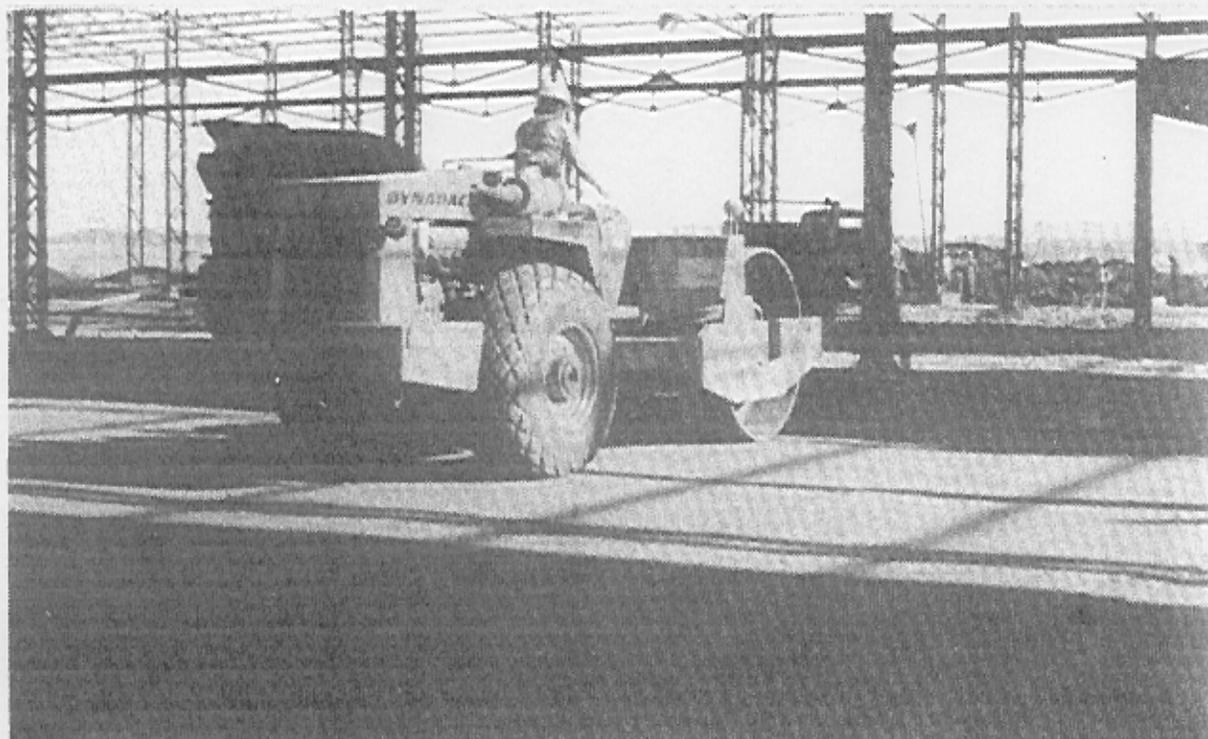


Foto 1 - Compactação do concreto com rolo vibratório no almoxarifado de Itaipu (Abril de 1976).

Entretanto, em 1978, houve possibilidade e interesse de utilizar o CCR na obra para preenchimento de uma rampa em rocha, construída para se ter acesso às fundações da Estrutura de Controle de Desvio do Rio.

A utilização desse concreto ensejou os primeiros estudos sistemáticos do CCR na Entidade, abrangendo: dosagem racional,

controle de qualidade, determinação das propriedades mecânicas, térmicas e elásticas, permeabilidade, lançamento, compactação, cura, etc.

As dosagens estudadas inicialmente, devido a falta de dados à época, tivessem proporções entre agregados praticamente iguais a do concreto massa convencional, apenas com um menor teor de água e ausência de finos. Isso levou a um CCR com algumas segregações (foto 2) e certa permeabilidade ($\pm 10^{-5}$ cm/s).

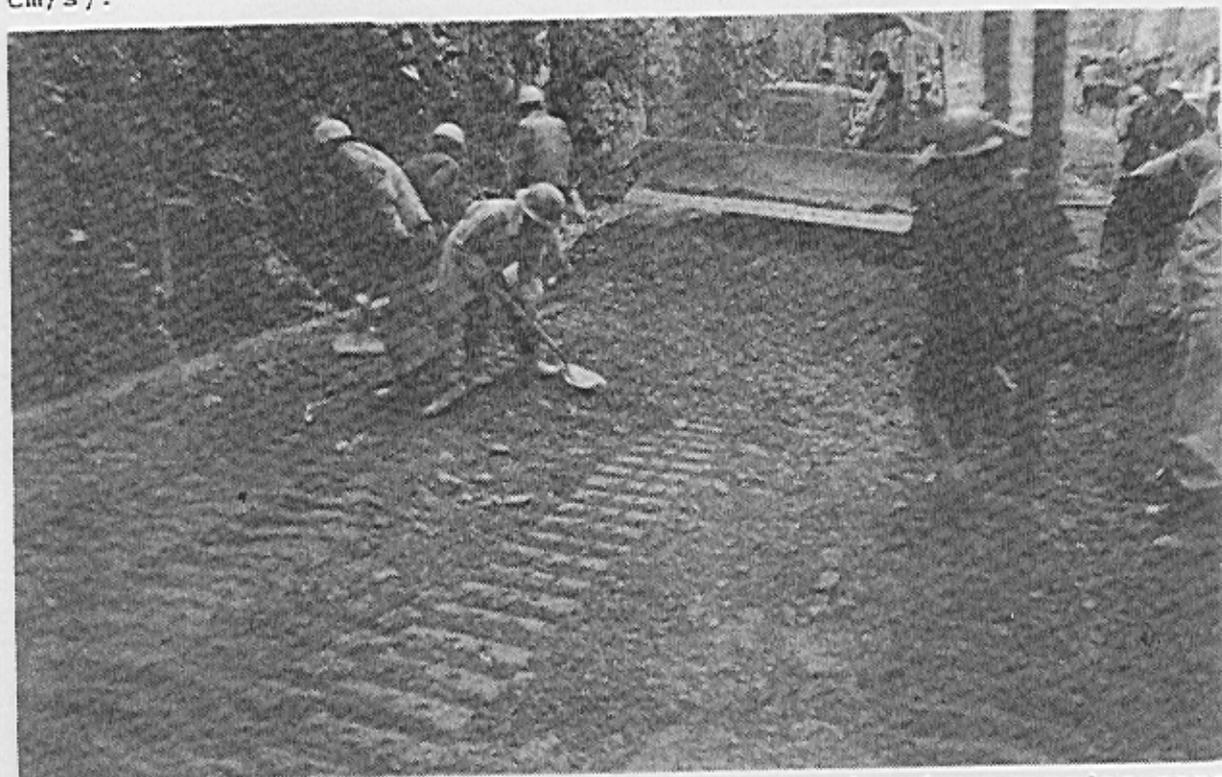


Foto 2 - Observa-se operários fazendo uso de pás e enxadas para eliminar alguns pontos de segregação (Maio de 1978).

A experiência adquirida proporcionou à Itaipu a oportunidade de realizar estudos e ensaios de CCR para outros projetos:

- Urugua-i (Argentina)
- Capanda (Angola)

Atualmente, o Laboratório de Concreto de Itaipu vem cooperando com a Cia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL), estudando e ensaiando CCR para ser empregado nas obras do desvio do Rio Jordão (UHE Segredo) e no Projeto da UHE de Salto Caxias. Esses ensaios estão em andamento.

2 - HISTÓRICO

2.1 - CCR PARA ITAIPU

CCR APLICADO NA RAMPA DE ACESSO

O volume de CCR aplicado para enchimento completo do "vazio" deixado pela rampa de acesso, e fazer a conseqüente concordância hidráulica das soleiras das Adufas com o leito do Canal de Desvio, foi de aproximadamente 26.000 m³, com pico diário de 3.054 m³ [1].

CCR APLICADO NA CASA DE FORÇA DO CANAL DE DESVIO

A utilização do CCR na rampa de acesso tinha caráter provisório, visto que no futuro haveria necessidade de retirá-lo para implantação da Casa de Força do Canal de Desvio. Mas, em função do ótimo desempenho e de uma melhoria considerável nas suas propriedades, verificados através de testemunhos extraídos desse concreto, quase 10 anos após sua aplicação, a estrutura foi incorporada à Casa de Força como definitiva [2].

ATERRO EXPERIMENTAL

Após a aplicação do CCR na rampa de acesso do Canal de Desvio, a equipe técnica da Itaipu Binacional passou a desenvolver estudos complementares e de otimização, tendo em vista outras aplicações. Esses estudos foram orientados no sentido de sanar algumas dificuldades observadas no proporcionamento das misturas, no controle de produção e no lançamento do CCR. Para tanto, foi executado um aterro experimental com um volume de CCR em torno de 250 m³ (foto 3). Nesse aterro, pode-se simular a compactação nas regiões próximas da forma e o preparo de juntas de construção por vários processos [3].



Foto 3 - Aterro experimental executado para estudos do CCR em Itaipu. Observa-se as juntas de subcamadas identificadas para extração de testemunhos (Junho de 1979).

ACESSO À ÁREA DE MONTAGEM CENTRAL

Outra aplicação de CCR em Itaipu ocorreu em 1980, posteriormente aos estudos no aterro experimental. O volume de CCR lançado neste acesso foi de aproximadamente 2.500 m^3 [3]. Observou-se então a evolução na qualidade do acabamento obtido (foto 4).

À época, procurava-se analisar a incorporação do "rejeito" da produção de areia artificial nos concretos. Esse "rejeito", considerado "pó de pedra", originado pela britagem do basalto são e denso da região de Itaipu, era ausente de argila e coesão. Os estudos mostraram vantagens e possibilidade de seu uso [9].

PESQUISAS ATUAIS

Visando o desenvolvimento do uso de novos produtos para melhorar algumas características do CCR, o Laboratório iniciou recentemente dois estudos. Em um deles está sendo pesquisado o efeito da adição de microssilica na permeabilidade e resistência do

CCR. No outro, estuda-se a eficiência, com relação à permeabilidade, de um aditivo a base de enzimas.

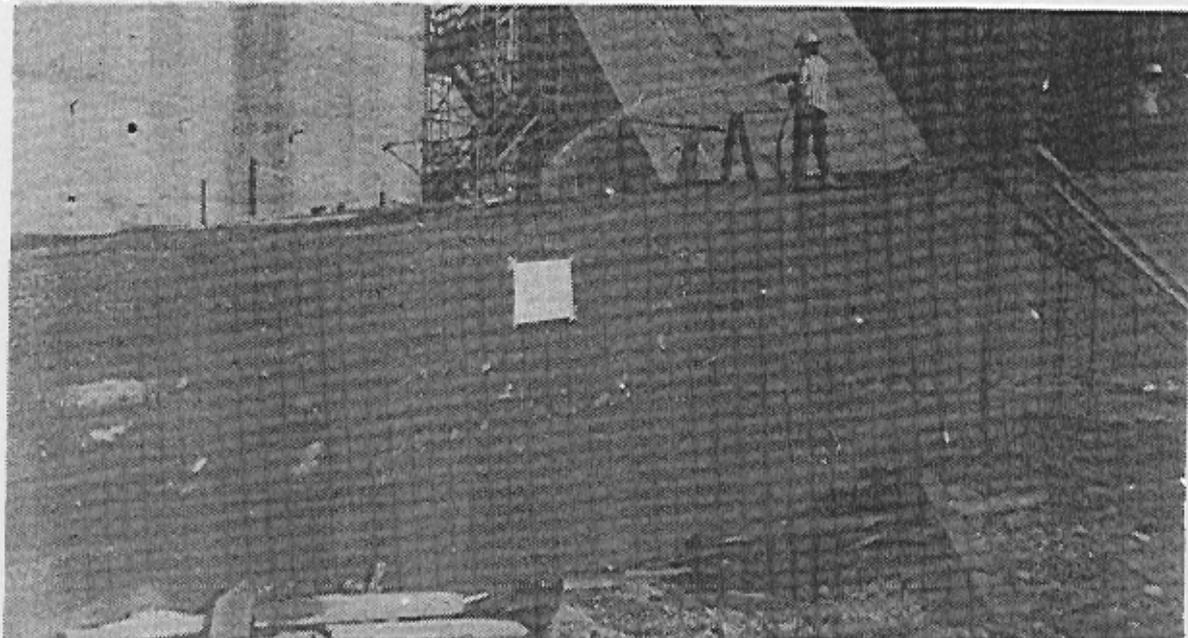


Foto 4 - CCR aplicado no acesso à Área de Montagem Central. Observa-se a boa qualidade do acabamento obtido (Agosto de 1979).

2.2 - CCR PARA URUGUA-i

A Usina Hidroelétrica de Urugua-i, localizada no extremo norte da província de Misiones, na Argentina, tem uma barragem em concreto com cerca de 700 m de comprimento e altura máxima de 76 m, onde foi aplicado um volume de aproximadamente 590.000 m³ de CCR.

Durante sua construção (1985 a 1989), a equipe técnica responsável pelo projeto, em conjunto com o Laboratório de Concreto da Itaipu, elaborou um amplo programa de ensaios visando conhecer as seguintes características do CCR empregado na obra: propriedades térmicas (elevação adiabática, calor específico, coeficiente de expansão térmica, difusividade e condutibilidade térmica), fluência, resistência à compressão triaxial, capacidade de alongamento, deformações autógenas, módulo de deformação e coeficiente de Poisson [4].

Além desses, foram executados ensaios de massa específica, resistência à compressão, tração diametral e permeabilidade, os quais já faziam parte do controle de qualidade de rotina.

Entretanto, foi dado ênfase ao ensaio de permeabilidade, tendo em vista ser esta considerada a propriedade mais crítica do CCR, em relação ao concreto convencional.

Os ensaios foram executados tanto com CCR dosados e moldados no Laboratório Itaipu, quanto com corpos de prova moldados na obra e/ou extraídos das estruturas e aterro experimental.

2.3 - CCR PARA CAPANDA

O Aproveitamento Hidroelétrico de Capanda é um empreendimento energético em construção pelo governo de Angola, na África. É constituído por uma barragem tipo gravidade, basicamente em CCR (764.000 m³), com altura máxima de 110 m.

As entidades envolvidas no projeto Capanda, contando com a colaboração do Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional, elaboraram um programa de estudos e ensaios visando conhecer detalhadamente as características e propriedades dos materiais disponíveis e dos concretos - convencionais e CCR - para uso na construção da obra [5].

Para execução dos ensaios, cerca de 60 t de materiais foram trazidos de Angola para o Laboratório de Itaipu.

3 - PROCEDIMENTOS PARA PROPORCIONAMENTO, MOLDAGEM E ENSAIOS

3.1 PROPORCIONAMENTO DA MISTURA

3.1.1 INÍCIO

Para o CCR inicial de Itaipu adotou-se, como diretriz básica, o interesse em se obter misturas que, depois do adensamento, proporcionassem máxima densidade. Portanto, a combinação dos agregados foi feita de forma a se obter o menor índice de vazios. O critério adotado foi a expressão abaixo, preconizada pelo U.S Army - Corps of Enginner para concreto massa [6].

$$P = \frac{d^x - (0,1875)^x}{(\phi_{m\acute{a}x})^x - (0,1875)^x} \times 100$$

Onde:

P = Porcentagem acumulada que passa na malha de abertura d

d = Abertura da malha

Ø = Diâmetro máximo nominal

X = Expoente para materiais britados (normalmente adotado
x = 0,8)

O teor de argamassa foi obtido experimentalmente, com base em informações da ACI - Comittee 207 [7] e do Corps of Engineers [8].

As modificações feitas após a primeira aplicação, em relação aos concretos convencionais utilizados em Itaipu, foram: alteração na proporção de areia natural e areia artificial do agregado miúdo, de 30%+70% para 40%+60%, e acréscimo na quantidade de reposição de cimento por material pozolânico, visando aproveitar o aumento de "finos" na argamassa.

3.1.2 URUGUA-i

Duas mudanças significativas ocorreram na dosagem do CCR para Urugua-i, em relação ao CCR de Itaipu: alteração na curva granulométrica e utilização de agregados mais finos que 0,075 mm para melhorar as características desse tipo de concreto. Assim, a curva granulométrica obtida se apresentou mais uniforme, melhorando a consistência, coesão e permeabilidade do CCR.

Inicialmente, para estudar o efeito de "finos", foram ensaiadas misturas com silte. Apesar dos resultados satisfatórios, observou-se que o silte encontrado na região do projeto apresentava, durante o manuseio, um alto índice de pelotização, devido a umidade e chuvas na região. Como alternativa, a equipe técnica do Laboratório da Itaipu sugeriu a substituição do silte pelo sub-produto da britagem do basalto (material passante na

peneira de 0,075 mm). Visto a alternativa ter-se mostrado técnica e economicamente viável, os agregados graúdo e miúdo produzidos por britagem foram utilizados sem lavagem [9].

Para composição dos agregados, as gamas granulométricas foram proporcionadas para atender a fórmula abaixo, sendo que as extremidades da curva foram ajustadas para o teor de finos (menor que 0,075 mm) adequado à mistura [4].

$$P = \left(\sqrt[3]{\frac{\phi}{\phi_{\text{máx}}}} \right) \times 100$$

Onde:

- P = Porcentagem passante, em peso
- ϕ = Diâmetro do agregado
- ϕ máx. = Diâmetro máximo do agregado

Para estudos do CCR de Urugua-i no laboratório foram usadas duas misturas com teor de cimento de, respectivamente, 60 e 90 kg/m³. A mistura de emprego predominante na obra foi a de menor consumo (60 kg/m³).

3.1.3 CAPANDA

Para dosar o CCR para Capanda, algumas premissas básicas foram adotadas:

- Baixo consumo de cimento;
- Ausência de areia natural;
- Ausência de material pozolânico;
- Máximo teor de areia artificial; e,
- Incorporação de "pó de pedra" (sub-produto da britagem).

É importante ressaltar que a ênfase dada à incorporação do "pó de pedra" já foi reflexo das vantagens técnico-econômica do seu emprego no CCR de Urugua-i.

Os benefícios apresentados pelo uso de "pó de pedra" no CCR de Urugua-i, e debatido com o projetista soviético do Projeto Capanda, despertaram grande curiosidade técnica. O Dr. Albert Ossipov, do Scientific Research Centre Hydroproject Institute, de Moscou, estudando em detalhe o tema, sugeriu a implantação do ensaio de Fixação da Cal (ver item 5.2).

Outra vantagem da utilização do "pó de pedra", visualizada pelos ensaios, foi a redução da expansão devido a reação alcalis-agregado [5].

3.2 - PROCEDIMENTOS PARA MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

Os procedimentos para moldagem de corpos de prova para ensaios tiveram que sofrer modificações, tendo em vista o adensamento usado no concreto convencional não ser adequado para o CCR.

Para estudos do CCR de Itaipu, efetuados em 1978, foram adotadas duas soluções:

- a) moldagem de corpos de prova utilizando a mesa vibratória do aparelho VeBe, sendo o adensamento auxiliado por um peso de aproximadamente de 23 kg, colocado sobre a mistura.
- b) execução de pequenas concretagens no pátio do laboratório usando como equipamento de adensamento um compactador portátil (foto 5). A compactação foi feita em sub-camadas de aproximadamente 18 cm do material solto (13 cm após a compactação), com altura total de moldagem de cerca de 45 cm. Os corpos de provas foram obtidos de testemunhos extraídos dessas concretagens.



Foto 5 - Compactação do CCR com compactador portátil para posterior extração de testemunhos (Abril de 1978).

Nas moldagens dos corpos de prova para os ensaios de Urugua-i e Capanda utilizou-se, para adensamento do CCR, um compactador pneumático tipo "perereca". A moldagem foi realizada em 4 camadas, com período de compactação de 50" por camada, em moldes cilíndricos de 25 x 50 cm.

3.3 - PROCEDIMENTOS PARA ENSAIOS

O ensaio mais usual para controle da água de amassamento, homogeneidade e condições de lançamento do concreto convencional é a determinação da consistência através do abatimento do tronco de cone (slump-test). Mas, como o CCR é um concreto com abatimento zero (no slump), adotou-se a mesa vibratória do aparelho VeBe para determinar a "trabalhabilidade" através da capacidade de adensamento.

Nos ensaios de fluência e deformação autógena para Urugua-i, tendo em vista a impossibilidade de se utilizar extensômetros

elétricos embutidos, adotou-se as seguintes opções:

- extensômetros elétricos, tipo wire strain gages, colados à superfície dos corpos de prova; e,
- bases mecânicas fixadas nos corpos de prova para medidas através de alongômetros Marion (foto 6) ou Tenso Test.

Para Capanda, foram utilizados extensômetros elétricos tipo Carlson, fixados externamente nos corpos de prova (foto 6), ao invés de se utilizar extensômetros elétricos tipo wire strain gages.—

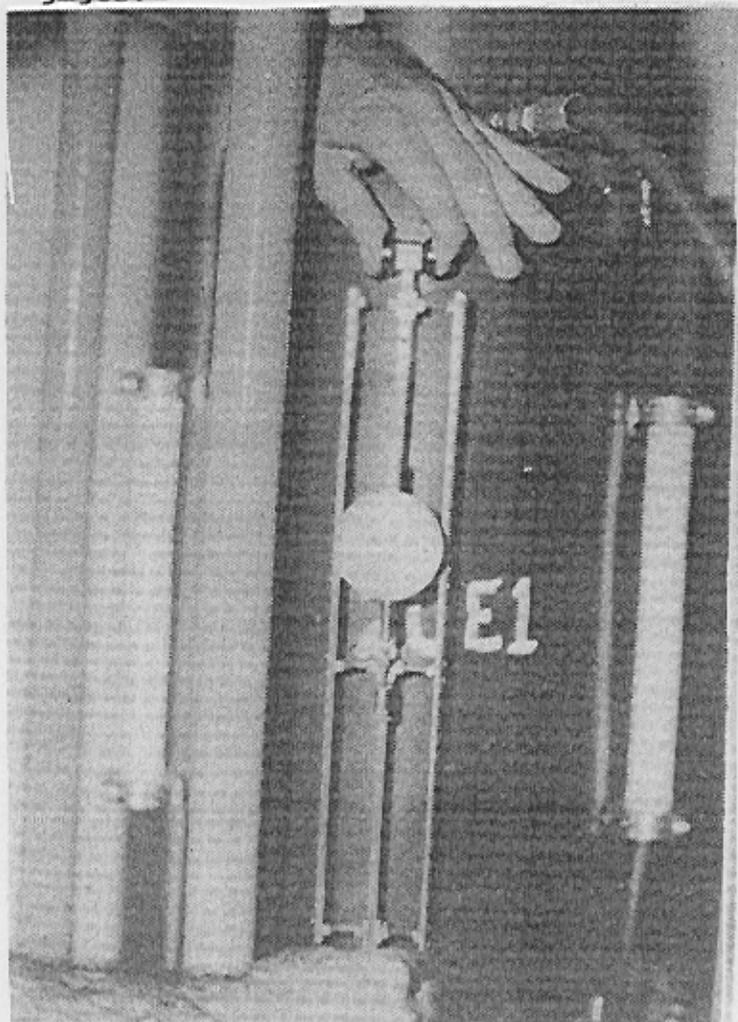


Foto 6 - Ensaio de fluência - medida de deformação utilizando-se o alongômetro Marion. Observa-se também os deformímetros tipo Carlson instalados na parte externa do corpo de prova.

Para determinação do coeficiente de expansão térmica e capacidade de alongamento à tração adotou-se, também, a opção do uso de extensômetros elétricos colados à superfície dos corpos de prova, em faces diametralmente opostas.

Nos ensaios de expansão térmica, os corpos de prova foram cortados longitudinalmente, com serra diamantada, para uniformizar a superfície de colagem dos extensômetros elétricos.

Nos ensaios de elevação adiabática, para facilitar a colocação dos termômetros no interior da massa de concreto, foi providenciada a instalação de um gabarito metálico com 3 hastes de aço de 1/2" de diâmetro (foto 7). Executou-se o adensamento do CCR com compactador tipo "perereca". Mas, em torno do local de instalação dos termômetros, o concreto foi peneirado (peneira com malha 1.1/2") e adensado com uma haste metálica.

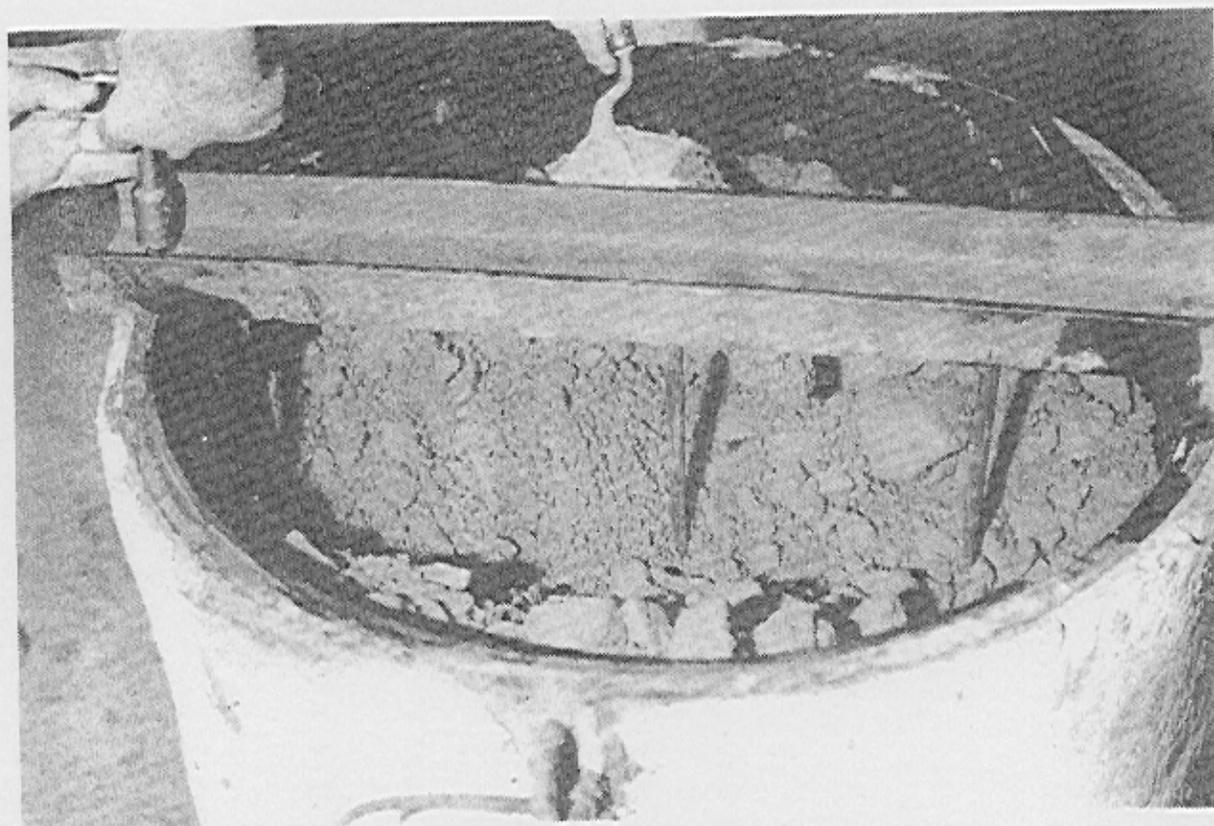


Foto 7 - Detalhe do gabarito para posterior instalação dos "tubos-guia" dos termômetros.

Os ensaios de difusividade térmica e calor específico foram feitos com testemunhos extraídos dos corpos de prova moldados para ensaios de elevação adiabática.

Os ensaios de capacidade de alongamento para Urugua-i foram executados sobre corpos de prova prismáticos (20x20x40 cm)

submetidos à tração pura. Esses corpos de prova foram preparados a partir de amostras de CCR retiradas do aterro experimental. Para Capanda, os ensaios de tração pura foram efetuados em corpos de prova cilíndricos de 25 x 50 cm. Para aplicação da carga de tração, foram coladas chapas metálicas nos topos dos corpos de prova.

Os ensaios de compressão triaxial foram executados com corpos de prova de 15x30 cm, extraídos de corpos de prova de 25x50 cm.

Duas modificações ocorreram no ensaio de permeabilidade: (a) diminuição da pressão de ensaio em relação à pressão preconizada pelo método, e (b) corte, ao meio, dos corpos de prova (25x50) moldados no laboratório. As partes foram então identificadas como superior e inferior.

4 - CONTROLE TECNOLÓGICO DO CCR DE ITAIPU

4.1 - NA PRODUÇÃO

O CCR foi produzido em centrais de concreto convencional, com capacidade nominal de 180 m³/h. Para controle, foram coletadas amostras tanto nas centrais quanto no local de lançamento, para determinação de densidade, temperatura, teor de ar incorporado e moldagem de corpos de prova para ensaios de resistência à compressão.

4.2 - NO LANÇAMENTO

O controle do teor de água, impossível de ser executado através da "trabalhabilidade", foi feito por meio de inspeção visual, no lançamento. Procurou-se trabalhar com o teor de água o mais "próximo" possível do teórico. Quando algum concreto era produzido mais "úmido", de tal forma a acarretar "borrachudos" durante a compactação, este material era revolvido e misturado pela lâmina do trator com um concreto mais "seco".

É importante lembrar que este tipo de controle exigiu uma equipe, na frente de lançamento, atenta e perfeitamente sincronizada com as centrais de produção para informar as necessidades de correção na mistura.

4.3 - EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS

Foram realizadas duas campanhas de extração de testemunhos do CCR aplicado na rampa de acesso do Canal de Desvio. A primeira, visando o controle de resistência do concreto empregado, ocorreu após o CCR ter alcançado 80 dias de idade. A segunda, foi realizada após o fechamento das adufas e esgotamento do Canal de Desvio, quando o CCR já tinha atingido uma idade superior a 8 anos (aproximadamente 3.000 dias). Esta campanha objetivou atestar a qualidade do CCR aplicado e, conseqüentemente a necessidade de retirá-lo para implantação das estruturas da Casa de Força do Canal de Desvio. Os resultados obtidos indicaram que o CCR aplicado poderia ser incorporado como estrutura definitiva.

As idades de ensaio dos testemunhos extraídos foram as seguintes:

- Corpos de prova da 1ª extração - 110 e 180 dias.
- Corpos de prova da 2ª extração - 3.090 dias (aproximadamente).

5 - ENSAIOS E RESULTADOS

5.1 - ENSAIOS DE CCR

As metodologias de ensaios adotadas para estudar o CCR no Laboratório de Itaipu não diferiram das especificadas para o concreto convencional, excetuando-se as modificações comentadas nos itens 3.2 e 3.3.

Os ensaios realizados, as misturas estudadas e os resultados médios obtidos estão sendo apresentados no item 7 [1] [2] [3] [4] [5] [9].

5.2 - OUTROS ENSAIOS

Além dos ensaios indicados nas tabelas acima mencionadas, o Laboratório de Itaipu procurou avaliar mais profundamente os efeitos do material "fino", proveniente da britagem de rochas, nas propriedades do CCR. Segundo o Dr. Albert Ossipov, os materiais

finos recém britados tem capacidade de absorver a cal liberada na hidratação do cimento, comportando-se como um aglutinante. Foi então desenvolvido um método de ensaio, baseado no método de Fratini e denominado "Fixação da Cal", para ensaiar os materiais britados (areia artificial) provenientes de basaltos (Itaipu e Urugua-i) e meta-arenito (Capanda). Os resultados obtidos comprovaram as expectativas do Dr. Ossipov [5].

Ainda com relação ao efeito do "pó de pedra" no concreto, foram realizados ensaios de reatividade potencial (Método das Barras e Método Acelerado) que indicaram o efeito benéfico desse material na redução da expansão devido a reação alcalis-agregado.

Realizou-se também um estudo para verificar o efeito da revibração no CCR, comparativamente a um concreto massa. Apesar de alguns pesquisadores afirmarem que concretos secos não se prestam à revibração, este estudo mostrou melhoria na resistência à compressão dos CCR, sendo mais sensível à medida que aumenta o teor de pasta da mistura [11].

Outro trabalho realizado no Laboratório de Itaipu e relacionado ao CCR, foi um estudo de caracterização de mantas de PVC para uso como material de vedação no paramento da barragem de CCR do projeto Capanda. Amostras de mantas desenvolvidas pelo fabricante e enviadas para o Laboratório de Itaipu, foram submetidas a uma série de ensaios, dentre os quais a determinação da resistência hidrostática, estabilidade dimensional, tensão de ruptura e alongamento à tração, resistência ao rasgamento, perda de voláteis e extração acelerada [10].

6 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

6.1 - A alteração da curva granulométrica e a utilização da fração dos agregados passante na peneira de 0,075 mm melhorou sensivelmente a compacidade das misturas de CCR, mostrando a importância da granulometria. Ressalta-se que a compactabilidade das misturas de CCR é um fator fundamentalmente importante para alcançar os limites de resistência e permeabilidade desejáveis.

6.2 - Como informado, foram utilizados três diferentes métodos para moldagem de corpos de prova em laboratório. Entretanto nenhum deles mostrou-se suficientemente adequado para ser padronizado. Observou-se que, de modo geral, a parte inferior dos corpos de prova apresenta-se mais compactada que a parte superior e a região entre as camadas é sempre o ponto mais frágil nos ensaios de ruptura.

6.3 - Por definição, o CCR "deve ser um concreto suficientemente seco para suportar o peso do equipamento de vibração, mas convenientemente úmido para permitir adequada distribuição da pasta ligante na massa do concreto". Portanto, a quantidade de água de amassamento do CCR é um fator muito importante a ser considerado. Mas, a determinação do teor de água no CCR tem sido de difícil solução através de ensaios padronizados. Inicialmente, foi tentada a determinação da consistência do CCR pelo consistômetro VeBe, com resultados insatisfatórios. O método VeBe modificado, através da colocação de um peso adicional para assentamento da mistura, também não se mostrou adequado. A avaliação da compactidade e do peso específico, obtidos por esse método, apresentou dispersões consideráveis. No campo, o controle do teor de água teve que ser feito por meio de inspeções visuais, conforme mencionado no item 4.2.

6.4 - Observou-se que, de modo geral, os resultados obtidos com corpos de prova de CCR, principalmente os moldados em laboratório, apresentaram maior dispersão que os de concreto convencional. Este fato deve-se a energia de compactação, conforme comentado no item 6.2. Portanto, a execução de aterro experimental na fase final de estudo das misturas e a realização de ensaios com testemunhos extraídos desse aterro parece ser a solução mais indicada, inclusive servindo como treinamento para a equipe que estará envolvida com a execução do CCR.

6.5 - Dados de resistência à compressão axial e resistência à tração possuem um valor apenas relativo, visto que dependem, fundamentalmente, do teor de aglomerantes da mistura. Portanto, julga-se que a maneira mais adequada para avaliar a resistência à compressão em um estudo de concreto seja expressá-la em termos de

"Coeficiente de Rendimento", que é a relação entre a resistência de um concreto e o seu consumo de aglomerante. Os coeficientes de rendimento das misturas de CCR estudadas mostraram-se coerentes com os das misturas de concreto massa de consumo equivalente.

6.6 - Além da compactação, o ensaio de fluência é afetado ainda pela precisão dos aparelhos mecânicos de medida ($\pm 0,02$ mm), muito pequena para o nível de deformações obtidas. Os extensômetros elétricos de resistência tipo wire strain gages, mostraram-se inadequados, tendo em vista a longa duração desse ensaio, enquanto que os extensômetros tipo Carlson apresentaram problemas de flambagem na região de fixação. Nos ensaios que estão sendo desenvolvidos para a COPEL, o Laboratório está usando um extensômetro mecânico de fixação externa e base de leitura para relógio comparador com precisão de 0,001 mm.

6.7 - Observou-se também que os coeficientes de variação nos ensaios de difusividade térmica (em torno de 9 %) estiveram acima dos obtidos com concretos convencionais (aproximadamente 2 %). Tendo em vista que o ensaio é feito com corpo de prova imerso em água, a permeabilidade do CCR é o principal fator de influência.

6.8 - Com relação aos resultados obtidos, pode-se verificar que as propriedades mecânicas - resistência à compressão axial, compressão diametral, coesão e cisalhamento - dos CCR mostram valores semelhantes aos dos concretos convencionais de mesmo consumo. Às primeiras idades o módulo de elasticidade apresentou-se um pouco inferior e os parâmetros de fluência mais elevados que dos concretos convencionais.

6.9 - Os valores de elevação adiabática de temperatura são coerentes com o consumo e tipo de aglomerantes utilizados. Os valores de propriedades térmicas - calor específico, difusividade e coeficiente de expansão térmica - também são semelhantes aos dos concretos convencionais com materiais de mesmas características.

6.10 - A permeabilidade do CCR esteve no início superior à dos concretos convencionais. Salienta-se, entretanto, que o uso de "finos" provenientes da britagem (fração passante na peneira de malha 0,075 mm) diminuiu (melhorou) o coeficiente de permeabilidade desse tipo de concreto. Como já mencionado, estuda-se atualmente o uso de microssilica e aditivos à base de enzimas para melhorar a permeabilidade do CCR. Por outro lado, a utilização de materiais de vedação no paramento de montante de barragens em CCR elimina o problema de infiltração através do concreto.

7 - TABELAS DE RESULTADOS

7.1 - DOSAGENS E PROPRIEDADES TÉRMICAS

O B R A		ITAIPU	CAPANDA		U R U G U A - I						
M I S T U R A		76-D03 (1)	RC-60	RC-100	PM-A 60	PM-B 60	PM-G 60	PM-A 90	PM-B 90	PM-G 90	PM-G 60 (1-2)
TIPO DE AGREGADO		BASALTO	META-ARENITO		B A S A L T O						
M A T E R I A L I S K /3 m	AGUA	71	90	90	85	90	75	85	95	80	100
	CIMENTO	91	60	100	60	60	60	90	90	90	60
	MATERIAL POZOLANICO	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SILTE	-	-	-	-	101	-	-	101	-	-
	AREIA NATURAL	303	278	275	180	176	173	178	176	170	204
	AREIA ARTIFICIAL	501	627	618	696	756	914	688	755	901	1.043
	AREIA MISTA	-	-	-	103	-	-	102	-	-	-
	BRITA 19 mm	429	580	572	-	-	-	-	-	-	-
	BRITA 25 mm	-	-	-	824	857	889	815	856	877	891
	BRITA 38 mm	556	557	549	-	-	-	-	-	-	-
	BRITA 64 mm	-	-	-	773	630	494	764	629	487	407
BRITA 76 mm	640	279	275	-	-	-	-	-	-	-	
MATERIAL < 0,075 mm NO AGREGADO TOTAL		<1,0%	3,5%	3,5%	4,0%	5,0%	5,1%	4,0%	5,1%	5,1%	-
ELEVACÃO ADIABÁTICA (°C)	14 dias	-	9,2	12,9	7,7	-	-	10,7	-	-	-
	28 dias	-	-	-	7,9	-	-	10,9	-	-	-
CALOR ESPECÍFICO (cal/g.°C)		-	0,230	-	0,238	-	-	0,233	-	-	-
DIFUSIVIDADE TÉRMICA (m ² /dia)		-	0,116	-	0,066	-	-	0,060	-	-	-
CONDUCTIBILIDADE TÉRMICA (cal/cm.s.°C)		-	7,4	-	4,8	-	-	4,2	-	-	-
COEFICIENTE EXPANSÃO TÉRMICA (10 ⁻⁶ /°C)		-	6,85	-	7,41	-	-	6,33	-	-	-
NOTA: 1 - DOSAGEM USADA NA ESTRUTURA 2 - DOSAGEM USADA NO ATERRO EXPERIMENTAL											

7.2 - MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO E PROPRIEDADES MECANICAS

E N S A I O		IDADE	ITAIPU	CAPANDA		U R U G U A - i					
				76-D03 (1)	RC-60	RC-100	PM-B 60	PM-G 60	PM-B 60	PM-G 90	PM-G 60 (1)
MASSA	S E C C A	28	-	2360	2366	-	-	-	-	-	2463
		90	-	-	-	2563	-	-	-	2520	-
		3090	2527	-	-	-	-	-	-	-	-
ESPECÍFICA (kg/m ³)	S A T U R A D A	28	-	2438	2450	-	-	-	-	-	2529
		90	-	-	-	2632	-	-	-	2616	-
		110	2507	-	-	-	-	-	-	-	-
		180	2524	-	-	-	-	-	-	-	-
		3090	2625	-	-	-	-	-	-	-	-
ABSORÇÃO (%)	28	-	3,32	3,54	-	-	-	-	-	-	
	90	-	-	-	-	-	-	-	3,90	-	
TENSÃO DE COMPRESSÃO AXIAL (MPa)	7	-	5,1	10,9	5,5	5,7	7,4	8,1	-	-	
	28	-	6,3	12,4	7,9	6,3	11,8	13,6	5,9	9,1	
	90	-	7,3	15,6	9,6	8,7	13,4	13,1	9,4	-	
	110	13,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
	180	14,9	7,8	14,0	-	-	-	-	-	-	
	3090	20,8	-	-	-	-	-	-	-	-	
TENSÃO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)	7	-	0,6	1,3	0,7	0,6	1,1	1,2	-	-	
	28	-	0,6	1,6	1,1	1,1	1,9	1,9	-	-	
	90	-	0,8	-	1,2	1,3	2,1	2,4	-	-	
	110	1,3	-	-	-	-	-	-	-	-	
	180	1,5	0,9	-	-	-	-	-	-	-	
	3090	2,3	-	-	-	-	-	-	-	-	
MÓDULO DE ELASTICIDADE (kg/cm ²)x10 ⁻³	7	-	6	15	16	16	34	53	-	-	
	28	-	8	21	36	28	102	114	21	-	
	90	32	12	25	76	46	169	159	28	16	
	110	27	-	-	-	-	-	-	-	-	
	180	34	15	24	-	-	-	-	-	-	
T R P A U Ç R A O	TENSÃO (MPa)	7	-	0,25	0,43	-	-	-	-	-	-
		28	-	0,24	0,65	-	-	-	-	-	0,53
		90	-	0,31	0,44	-	-	-	-	0,60	-
		180	-	0,34	0,75	-	-	-	-	-	-
	CAPAC. ALONGAM. (x10 ⁻⁶ mm/ mm)	7	-	15,0	20,0	-	-	-	-	-	-
		28	-	26,8	31,8	-	-	-	-	-	33,7
		90	-	17,0	20,0	-	-	-	-	27,7	-
		180	-	29,0	55,0	-	-	-	-	-	-
NOTA: 1 - TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS DA ESTRUTURA											
2 - TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS DE ATERRO EXPERIMENTAL											

7.3 - FLUENCIA, TRIAXIAL E PERMEABILIDADE

E N S A I O		IDADE (DIAS)	C A P A N D A		U R U G U A - i	
			RC - 60	RC - 100	PM-G 60 (1)	PM-G 60 (2)
COMPRESSÃO	COESÃO (MPa)	28	-	3,2	-	2,5
		90	1,6	3,8	-	-
TRIAxIAL	ANGULO DE ATRITO	28	-	42	-	48
		90	49	45	-	-
FLUENCIA	1/E ($\times 10^{-6}$ / MPa)	7	1,82	-	-	-
		28	1,33	-	-	-
		90	0,81	-	0,69	-
		180	0,68	-	-	-
	f (k) ($\times 10^{-6}$ / MPa)	7	0,097	-	-	-
		28	0,092	-	-	-
		90	0,051	-	0,50	-
		180	0,048	-	-	-

C O P E F I C I E N T I D A D E (cm/s)	PRESSÃO DE ENSAIO (PSI)	IDADE D I A S	ITAIPU	C A P A N D A		U R U G U A - i				
			76-D03	RC-60	RC-100	PM-B 60	PM-G 60	PM-B 90	PM-G 90	PM-G 60 (2)
25	60	-	-	-	-	$1,20 \times 10^{-7}$	-	-	-	-
	90	-	-	-	-	$0,93 \times 10^{-7}$	-	-	-	-
50	60	-	-	-	-	-	-	$7,79 \times 10^{-9}$	$4,96 \times 10^{-8}$	-
	90	-	-	-	-	-	$3,43 \times 10^{-7}$	$5,08 \times 10^{-9}$	$4,51 \times 10^{-8}$	-
100	28	-	$2,24 \times 10^{-5}$	$1,30 \times 10^{-5}$	-	-	-	-	-	-
			$2,36 \times 10^{-5}$	$4,40 \times 10^{-6}$	-	-	-	-	-	-
	90	-	$3,03 \times 10^{-5}$	$3,35 \times 10^{-6}$	-	-	-	-	-	-
180	-	$9,99 \times 10^{-6}$	$1,59 \times 10^{-7}$	-	-	-	-	-	-	-
180	$1,0 \times 10^{-5}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3090	$1,1 \times 10^{-5}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Betioli, L. Scanduzzi, F. R. Andriolo -- Aplicação de concreto adensado com rolo vibratório na obra da hidrelétrica de Itaipu.
- [2] J. M. Zaleski, L. A. Seifart S., J. A. Braga, L. C. Rosário - Concreto adensado com rolo vibratório - Dados sobre uso na Itaipu Binacional com aproximadamente 10 anos de idade (XVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens).
- [3] I. Betioli, L. Scanduzzi, F. R. Andriolo - Concreto adensado com rolo vibratório (XIII Seminário Nacional de Grandes Barragens).
- [4] M. R. Zanella, J. A. Braga, L. C. Rosário, A. G. Chenú Ayala, F. R. Andriolo, M. Golik - Concreto rolado - Ensaios especiais (XVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens).
- [5] J. A. Braga, M. R. Zanella, J. M. Zaleski, F. R. Andriolo - Uso de concreto rolado, projeto Capanda (Angola) - Ensaios especiais (XIX Seminário Nacional de Grandes Barragens).
- [6] Proportioning Concrete Mixes - A.C.I. SP-46, SP-46.6 - Mixture Proportioning for Mass Concrete.
- [7] Roller Compacted Concrete - Committee 207 - American Concrete Institute.
- [8] Roller Compacted Concrete Studies at Lost Creek Dam U.S. Army Enginner District, Portland - Oregon.
- [9] J. A. Braga, L. C. Rosário, J. D. Carrera D., S. S. Lacerda - Utilização de finos, sub-produto de britagem nos concreto rolado e convencional (XVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens).
- [10] Ensaio de manta de PVC - Projeto Capanda (Angola) - RC-04/90
- [11] J. A. Braga, L. C. Rosário, F. R. Andriolo - Efeito da revibração nos concretos massa e rolado (XIX Seminário Nacional de Grandes Barragens).