



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº10.435, de 24 de abril de 2002

Mestrado em Engenharia da Energia
Área de Concentração: Geração Hidrelétrica

O USO DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO EM BARRAGENS – TENDÊNCIAS FUTURAS

Dissertação de Mestrado

Autor

Luiz Milani Filho

Orientador

Prof. Dr. Zulcy de Souza

Co-Orientador

Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Itajubá, MG – Brasil

Dezembro de 2003

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

M637u

Milani Filho, Luiz

O uso do concreto compactado com rolo em barragens - tendências futuras / por Luiz Milani Filho. -- Itajubá (MG) : [s.n.], 2003.
100 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Zulcy de Souza
Co-orientador : Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá -
Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Barragem. 2. Concreto. 3. CCR. 4. Hidrelétrica. I. Souza, Zulcy de, orient. II. Bortoni, Edson da Costa, co-orient. III. Universidade Federal de Itajubá - Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU 627.82(043)



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº10.435, de 24 de abril de 2002
Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 403 de 08 de Dezembro de 2003, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **“O Uso do Concreto Compactado com Rolo em Barragens - Tendências Futuras”** apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia da Energia, na Área de Concentração Geração Hidrelétrica**, satisfeitas as demais exigências regimentais, a **Luiz Milani Filho**.

Itajubá, 10 de Dezembro de 2003.

Aellington Freire de Araújo
1º Examinador - FEPI

Arthur Benedicto Ottoni
2º Examinador - UNIFEI

Edson da Costa Bortoni
3º Examinador - UNIFEI

Zulcy de Souza
4º Examinador - UNIFEI- Orientador



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº10.435, de 24 de abril de 2002
Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **“O Uso do Concreto Compactado com Rolo em Barragens - Tendências Futuras”**

Autor: **Luiz Milani Filho**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Observações:

- 1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- 2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- 3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Resultado Final: A ou seja, Aprovado

Observações: _____

Itajubá, 10 de Dezembro de 2003.

Aellington Freire de Araújo
1º Examinador - FEPI

Arthur Benedicto Ottoni
2º Examinador - UNIFEI

Edson da Costa Bortoni
3º Examinador — (Co-Orientador) UNIFEI

Zulcy de Souza
4º Examinador — (Orientador) – UNIFEI

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado ao meu pai, Luiz Milani, que, não tendo oportunidade de estudar, trabalhou arduamente para proporcionar uma boa formação aos filhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Doutor Zulcy de Souza, e ao co-orientador, Prof. Doutor Edson da Costa Bortoni, pelo empenho prestado para a conclusão desta dissertação.

Ao amigo e engenheiro Francisco Miguel S. C. H. Alves, que, durante a construção da UHE Dona Francisca, foi o responsável pela inspiração que deu origem a este projeto.

Ao engenheiro Francisco Andriolo Rodrigues, pelas informações enviadas e também pelas publicações de suma importância para a realização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho da LEME Engenharia, em especial à engenheira Waldaisy Santana Abreu Sifuentes, que sempre apoiou o desenvolvimento desta dissertação.

À minha mãe, e aos meus irmãos e amigos, por terem acreditado nesta realização e pelo apoio incondicional durante todos os momentos em que estive afastado.

Pelo carinho recebido da família Saúde Caires, que sempre contribuíram, de uma forma ou outra, para a idealização de meus objetivos.

SUMÁRIO

Lista de tabelas.....	5
Lista de figuras.....	6
Siglas e abreviaturas.....	9
Resumo.....	11
Abstract.....	12
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Definição.....	13
1.2 O surgimento do CCR.....	13
1.3 Objetivos.....	14
1.4 Estrutura do trabalho.....	14
Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Introdução.....	16
2.2 Histórico.....	16
2.3 Principais propriedades do CCR.....	20
2.3.1 Massa específica.....	20

2.3.2 Resistência à compressão.....	21
2.3.3 Resistência à tração.....	25
2.3.4 Resistência ao cisalhamento e ângulo de atrito.....	25
2.3.5 Módulo de deformação e coeficiente de Poison.....	26
2.3.6 Deformação lenta (fluência).....	27
2. 3.7 Capacidade de alongamento.....	27
2.3.8 Variação de volume.....	28
2.3.9 Permeabilidade e absorção.....	29
Capítulo 3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS.....	30
3.1 Introdução.....	30
3.2 Classes de concreto.....	30
3.3 Materiais.....	32
3.4 Composição dos concretos e argamassa.....	34
3.5 Central de concreto compactado com rolo.....	36
3.6 Execução do concreto compactado com rolo.....	37
3.7 Execução da junção entre o CCR e o CCV.....	52

3.8 Drenagens e galerias.....	53
3.9 Ensaios e controle.....	55
3.10 Pista experimental.....	56
3.11 Instrumentação.....	59
Capítulo 4 - CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	60
4.1 Introdução.....	60
4.2 Planejamento.....	60
4.3 Custos.....	61
4.4 Aplicações.....	64
4.5 Razões de emprego.....	67
Capítulo 5 - TENDÊNCIAS FUTURAS.....	69
5.1 Introdução.....	69
5.2 Paramentos hidráulicos.....	69
5.3 O CCR enriquecido com argamassa ou GERCC.....	74
5.3.1 Execução do GERCC.....	75
5.3.2 Vantagens do GERCC.....	77
5.3.3 Desvantagens do GERCC.....	78

5.3.4 Resultados do GERCC.....	79
5.4 O método rampado.....	79
5.4.1 Execução do método rampado.....	81
5.4.2 Vantagens do método rampado.....	87
5.4.3 Desvantagens do método rampado.....	88
5.4.4 Resultados do método rampado.....	89
Capítulo 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	92
Capítulo 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa específica do CCR de diversas obras.....	21
Tabela 2 – Misturas de concreto: aplicação no campo.....	24
Tabela 3 – Misturas de concreto: aplicação no campo.....	31
Tabela 4 – Critérios usuais de lançamento e tratamento das juntas.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação consumo de cimento e resistência à compressão.....	22
Figura 2 – Relação consumo de cimento com pozolâna e resistência à compressão.....	22
Figura 3 – Resistência à compressão para diferentes consumos de cimento.....	23
Figura 4 – Variação do módulo de elasticidade com o consumo de aglomerante.....	26
Figura 5 – Curva granulométrica utilizada em Capanda Dam.....	33
Figura 6 – Seção transversal e detalhe da barragem da UHE Dona Francisca.....	35
Figura 7 – Central de concreto da UHE Lajeado.....	37
Figura 8 – Preparação da fundação na UHE Lajeado.....	38
Figura 9 – Lançamento de CCR realizado por caminhão basculante.....	41
Figura 10 – Espalhamento do CCR realizado por trator de esteiras.....	45
Figura 11– Tipos de rolos vibratórios em Watershed Dam.....	47
Figura 12 – Curva de compactação.....	49
Figura 13 – Curva de controle de compactação da UHE Cana Brava.....	49
Figura 14 – Compactação com rolo vibratório na UHE Lajeado.....	50
Figura 15 – Espaçamento das juntas de contração na UHE Dona Francisca.....	51

Figura 16 – Diagramas de tensões para barragem com e sem galeria de drenagem.....	54
Figura 17 – Detalhe da galeria de drenagem na UHE Dona Francisca.....	54
Figura 18 – Pista experimental de campo da barragem Olivenhain - USA.....	57
Figura 19 – Pista experimental de CCR do laboratório de concreto de Furnas.....	58
Figura 20 – Croqui da pista experimental de laboratório da UHE Lajeado.....	58
Figura 21 – Sensores de temperatura na barragem de Salto Caxias.....	59
Figura 22 – Custo unitário do CCR.....	62
Figura 23 – Custo unitário do CCR no Brasil e no mundo.....	63
Figura 24 – Variação anual do custo do cimento.....	64
Figura 25 – Pavimentação da BR-232 em CCR.....	66
Figura 26 – Compactação de pavimento industrial da Honda - EUA.....	66
Figura 27 – Copperfield Dam na Austrália.....	70
Figura 28 – Detalhe do paramento de jusante em CCV da UHE Dona Francisca.....	71
Figura 29 – Paramentos hidráulicos da UHE Dona Francisca.....	72
Figura 30 – Espessura do paramento hidráulico.....	73
Figura 31 – Processos de adensamento do GERCC em Tannur e Jiangya Dam.....	76

Figura 32 – A barragem de Jiangya durante a construção.....	81
Figura 33 – Detalhe da inclinação das camadas na UHE Lajeado.....	83
Figura 34 – Procedimentos do método rampado.....	83
Figura 35 – Processo de execução do método rampado.....	84
Figura 36 – Controle de inclinação das camadas de CCR na UHE Lajeado.....	85
Figura 37 – Detalhe do paramento de jusante executado em degraus.....	86
Figura 38 – Elevação da temperatura no concreto – método tradicional.....	90
Figura 39 – Elevação da temperatura no concreto – método rampado.....	90
Figura 40 – Comparação de produtividades: método tradicional x método rampado.....	91
Figura 41 – Comparação de custos: método tradicional x método rampado.....	91

SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AHE – Aproveitamento hidrelétrico

A/C – Relação água cimento

ASCE – American Society of Civil Engineers

CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CIGB – Commission Internationale des Grands Barrages

CIRIA – Construction Industry Research and Information Association

CCR – Concreto compactado com rolo

CCV – Concreto convencional vibrado

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

Concreto Rolado – Concreto compactado com rolo

CP – Corpo de prova

D_{máx.} – Dimensão máxima característica

F_{ck} – Resistência característica à compressão

GERCC – Grout enriched roller compacted concrete

ICOLD – International Commission on Large Dams

IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto

UHE – Usina hidrelétrica

USACE – US Army Corps of Engineers

USCOLD – United States Committee on Large Dams

RCC – Roller compacted concrete

RCCP – Roller compacted concrete pavement

RCD – Roller compacted dam

Rollcrete – Roller compacted concrete

TVA – Tennessee Valley Authority

RESUMO

Nas últimas décadas ocorreu um espetacular desenvolvimento na construção de barragens. Além de ter possibilitado o conhecimento da tecnologia da construção, houve um expressivo desenvolvimento da tecnologia de concreto para barragens, com destaque especial para o concreto compactado com rolo (CCR). As barragens em concreto compactado com rolo têm sido uma forte alternativa se comparada as tradicionais barragens de terra, as barragens de enrocamento e as barragens de enrocamento com face de concreto. Com o recente surgimento de novas técnicas e métodos construtivos, o CCR alcançou agilidade de execução e economia de custo significativa na construção de barragens de concreto. Entre as novas técnicas construtivas, destacam-se o método rampado e o CCR enriquecido com argamassa (Grout Enriched Roller Compacted Concrete – GERCC). Este trabalho tem como objetivos apontar tendências e perspectivas futuras para a construção de barragens em concreto compactado com rolo e realizar um estudo comparativo da metodologia tradicional de execução do CCR com o método rampado e o CCR enriquecido com argamassa.

ABSTRACT

In the last decades a spectacular development took place in the construction of dams. Besides making possible the knowledge of the construction technology, there was an expressive development of the concrete technology for dams, with special prominence for the roller compacted concrete. The roller compacted concrete dams have been a strong alternative if compared with the traditional earth dams, with the rockfill dams and with the concrete face rockfill dams. With the recent appearance of new techniques and constructive methods, RCC reached execution agility and significant cost economy in the construction of concrete dams. Among the new constructive techniques, the sloped layer and grout enriched roller compacted concrete (GERCC) stand out. This work has as objectives to point out tendencies and future perspectives for construction of roller compacted concrete dams and to develop a comparative study between the traditional methodology of execution of RCC with the sloped layer and the grout enriched roller compacted concrete.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Definição

“Concreto compactado com rolo (CCR) é definido como sendo um concreto de consistência seca – ‘no slump’, aspecto arenoso com propriedades próprias, que é transportado, espalhado e compactado de forma contínua, através de maquinários usualmente aplicados em obras de terra e enrocamento.” (OLIVEIRA, SALLES, 1995)

1.2 O surgimento do CCR

O uso da tecnologia do concreto compactado com rolo na construção de barragens surgiu no princípio dos anos 70 e destacou-se a partir da década de 80. Neste momento, inúmeras obras de barragens em concreto estão sendo executadas, ou em fase de projeto, em diversas partes do mundo, utilizando como metodologia de construção essa técnica.

Nas últimas décadas, a construção de barragens experimentou um espetacular progresso, que possibilitou o desenvolvimento da tecnologia da construção, da tecnologia de concreto para barragens, com destaque especial para o concreto compactado com rolo (CCR).

A maior ênfase na aplicação da tecnologia do CCR ocorreu nos anos 80, quando veio competir diretamente com as barragens de concreto convencional vibrado (CCV). Atualmente, as barragens que usam essa tecnologia têm disputado espaço até mesmo com as barragens de terra, as de enrocamento e as de enrocamento com face de concreto (FURNAS, 1997).

A necessidade de se construir barragens em prazos antes inimagináveis, a custo cada vez mais baixo, proporcionou o desenvolvimento atual da metodologia de construção do concreto compactado com rolo.

1.3 Objetivos

Neste trabalho, desenvolvido com a finalidade de averiguar a possibilidade de obtenção de melhores performances e resultados com o CCR, aborda-se como tema principal o uso do concreto compactado com rolo em barragens, com os seguintes os seus objetivos:

- apontar tendências futuras para obras que envolvam a execução do concreto compactado com rolo e;
- realizar um estudo comparativo entre a metodologia tradicional de execução do concreto compactado com rolo e novos métodos construtivos, em especial o método rampado e o CCR enriquecido com argamassa (GERCC).

1.4 Estrutura do trabalho

A partir de uma extensa pesquisa bibliográfica, o trabalho de dissertação foi desenvolvido com base nos seguintes tópicos:

- No Capítulo 1, realiza-se uma breve contextualização do tema, apresentam-se os objetivos e faz-se uma descrição da estrutura dos diversos capítulos.
- No do Capítulo 2, faz-se um relato histórico e apresentam-se as principais propriedades do concreto compactado com rolo. Busca-se, a partir de trabalhos publicados e de fatos ocorridos no passado, destacar o surgimento e o desenvolvimento da tecnologia do CCR.

- No Capítulo 3, descrevem-se as especificações técnicas tradicionalmente utilizadas, envolvendo as disciplinas e os requisitos necessários à execução prática de barragens em concreto rolado.
- No Capítulo 4, trata-se das características gerais de projetos que envolvem o concreto compactado com rolo. São abordados aspectos de planejamento, custos, aplicações e razões de emprego em relação aos demais tipos de barragens.
- No Capítulo 5, apontam-se tendências, inovações tecnológicas e perspectivas para a execução de barragens em concreto compactado com rolo. Apresentam-se os resultados comparativos entre o método rampado e o GERCC (CCR enriquecido com argamassa), com a metodologia tradicionalmente utilizada na execução do CCR.
- No Capítulo 6, faz-se uma análise conclusiva, com recomendações e sugestões.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Neste capítulo, faz-se um relato histórico sobre o concreto compactado com rolo e apresentam-se suas principais propriedades. Busca-se, a partir de trabalhos publicados e de fatos ocorridos no passado, focalizar o surgimento e o desenvolvimento da tecnologia do CCR.

2.2 Histórico

Barragens têm sido construídas há milhares de anos; para controlar inundações; para represar águas, como fonte de geração de energia hidrelétrica; para fornecer água para o consumo humano; para o uso industrial; ou para irrigar plantações.

As barragens constituem um importante meio de atender às necessidades de consumo de água e energia e um investimento estratégico de longo prazo capaz de oferecer múltiplos benefícios. Alguns, típicos de todos os grandes projetos de infra-estrutura; outros, exclusivos das barragens e específicos de determinados projetos.

No início deste novo século, muitos países tornaram-se dependentes das usinas hidrelétricas para produzir a sua eletricidade. Particularmente no Brasil, cerca de 80% da geração de energia elétrica é proveniente de energia hidráulica.

Por volta de 1950, os governos e o setor privado (em alguns países) já estavam construindo um número cada vez maior de barragens, à medida que as populações aumentavam e as economias cresciam. Até 1950, as barragens de concreto representavam cerca de 38% das barragens com mais de 15 m de altura construídas em todo o mundo (com exceção da China). Entre 1951 e 1977, esse número de barragens de concreto decresceu para 25%. Entre 1978 e 1982, baixou ainda mais, chegando à marca de 16,5%. Esse declínio deu-se em razão do elevado custo do concreto e do aumento da popularidade das barragens de terra e enrocamento, impulsionado pelo desenvolvimento da tecnologia de mecânica dos solos (HANSEN, 1991).

Em 1970 e em 1972, realizaram-se as conferências de Asilomar, nos Estados Unidos. A busca pela segurança das barragens de concreto e a eficiência da construção das barragens de terra centralizam a atenção. Destaca-se o trabalho denominado *The Optimum Gravity Dam*, de Raphael, J. M., em 1970, que destaca a aplicação de equipamentos de construção de maciços de terra e de rocha para a construção de maciços de concreto, conduzindo, assim, ao desenvolvimento da metodologia do concreto compactado com rolo.

Um importante ponto de partida para o desenvolvimento de novos métodos de construção de barragens de concreto ocorreu entre 1958 e 1964, na Itália com a construção da barragem de Alpe Gera. Em lugar dos tradicionais blocos de concreto verticais, o concreto foi lançado em várias camadas horizontais, com cerca de 0,70 m de altura. Assim, a barragem de concreto foi executada com metodologias de construção de barragem de terra, sendo o concreto transportado por caminhões fora de estrada e espalhado com trator de esteira do tipo Bulldozer. O adensamento do concreto foi realizado com vibradores de imersão. Tal fato impediu que a barragem de Alpe Gera se tornasse a primeira a ser executada em concreto compactado com rolo. Um método construtivo similar foi usado na mesma época, na barragem de Quaira Della Miniera, também na Itália (GENTILE, 1964).

John Lowe publicou, em 1981, um artigo sobre aplicação do concreto compactado com rolo em uma ensecadeira com 65 m de altura em Formosa, em 1962, na barragem de Shihmen. Essa técnica recebeu a denominação de *rollcrete*, abreviação de *roller compacted concrete*.

O Corps of Engineers, dos Estados Unidos, no início dos anos 70, realizou estudos em aterros e ensaios em laboratório para a barragem de Elk Creek. Em maio de 1973, um amplo estudo foi elaborado, pelo mesmo corpo de engenheiros na barragem de Lost Creek, também nos Estados Unidos.

Em 1965, construí-se no Canadá a barragem de Manicougan, com a mesma técnica de lançamento horizontal. O conceito desta técnica era de que uma barragem de concreto à gravidade poderia ser projetada em três partes: uma de montante, contendo uma região de concreto impermeável; a parte central, com concreto pobre; e o paramento de jusante, composto por blocos pré-moldados. A aplicação resultou em uma economia de em torno de 20% no custo e uma redução de 2/3 do tempo de execução, se comparado com a metodologia tradicionalmente utilizada (WALLINGFORD, 1979).

Em 1974, com o objetivo de reduzir os custos e os prazos executivos de barragens de concreto, o Ministério das Construções do Japão, por intermédio do Committee on Rationalized Construction of Concrete Dams, realizou um programa de pesquisas em que procurou, de antemão, manter a qualidade e o aspecto das barragens de concreto gravidade. O estudo preliminar relatou que a metodologia adotada na barragem de Alpe Gera combinada com o processo de compactação com rolo vibratório seria a linha mais conveniente a ser seguida (ANDRIOLO, 1989).

Uma avaliação da metodologia descrita foi observada em 1976, numa ensecadeira de montante da barragem de Ohkawa. Utilizou-se concreto convencional adensado por vibradores de imersão nas faces dos paramentos da barragem, e o núcleo foi executado simultaneamente com concreto compactado com rolo. Após essa aplicação, seguiram-se diversas outras execuções de aterros experimentais e ensaios de laboratório (ANDRIOLO, 1989).

Em 1981, foi relatado nos Proceedings of the International – Conference of Construction Industry Research and Information Association, em Londres, que na barragem de Shimajigawa, concluída em 1980, e em parte da barragem de Ohkawa foi utilizado o método construtivo em concreto compactado com rolo. A barragem de Shimajigawa tornou-se a primeira no mundo construída em CCR.

Entre 1974 e 1982, algo em torno de 2.700.000 m³ de concreto compactado com rolo foram aplicados na barragem de Tarbela, no Paquistão. A aplicação do concreto rolado ocorreu, inicialmente, em substituição à rocha e maciço, quando, durante o enchimento do reservatório, um dos quatro túneis sofreu colapso. Durante os reparos ocorridos no túnel, foram lançados em torno de 350.000 m³ de concreto rolado, compactados em 42 dias de trabalho, com um pico de 18.000 m³/dia. Um fato importante ocorreu durante as cheias de 1980; parte do concreto compactado com rolo, desprotegido e próximo ao vertedouro de serviço, foi submetido a elevadas vazões, não sendo verificado nenhuma erosão de ordem significativa. Tal acontecimento serviu para confirmar confiabilidade à erosão do concreto rolado, quando submetido ao fluxo d'água (HANSEN, 1991).

Em 1982, foi notificado o término, em menos de cinco meses, da barragem de Willow Creek, com 52 m de altura, localizada nos Estados Unidos. Foi a primeira grande barragem no mundo totalmente construída em concreto compactado com rolo, com volume de CCR em torno de 329.000 m³ (ANDRIOLO, 1989).

A primeira aplicação de concreto compactado com rolo em barragens no Brasil ocorreu em 1978, na Itaipu Binacional. Na ocasião, foi aplicado na rampa de acesso às fundações da estrutura de desvio um volume total de 26.000 m³, com pico de concretagem de 3.054 m³/dia. No mesmo ano, o concreto compactado com rolo foi empregado na barragem de São Simão, onde foram lançados cerca de 40.000 m³, em camadas de 50 cm de altura, no preenchimento das galerias de desvio, na parede de concreto e na regularização. Em 1982, foi relatado o primeiro lançamento de CCR em estrutura permanente. A aplicação ocorreu no muro direito da eclusa de navegação de Tucuruí, com um volume de cerca de 12.000 m³, executados em camadas de 25 cm de altura. Na Usina Hidrelétrica de Três Marias, foram utilizados aproximadamente 14.600 m³ de concreto rolado na modificação do perfil do vertedouro (KUPERMAN, 1996).

Sem dúvida, um importante marco na aplicação de concreto compactado com rolo no Brasil ocorreu em 1986, quando a barragem de Saco de Nova Olinda, localizada na Paraíba, com 56 m de altura e volume de CCR de 138.000 m³ foi construída em pouco mais de três meses, obtendo pico de concretagem de 2.500 m³/dia. Os resultados e detalhes

desta obra receberam destaque tanto no país como no exterior, especialmente pelo custo praticado do concreto rolado, em torno de US\$ 40/m³. Foi a primeira barragem brasileira totalmente construída em concreto compactado com rolo e também a primeira barragem de CCR em arco construída no mundo (ANDRIOLO, 1998).

2.3 Principais propriedades do CCR

O concreto compactado com rolo tem praticamente as mesmas características das propriedades significativas do concreto convencional. Os valores obtidos para as diversas propriedades têm mostrado grande semelhança entre os dois tipos de concreto. Algumas diferenças são geradas, em sua maior parte, na dosagem, pois o CCR possui menor teor de água e de pasta que o concreto convencional.

O que basicamente difere os dois processos é o modo de adensamento. Caso não ocorra similitude entre CCR e o convencional, as causas podem ser atribuídas à diferença na dosagem, granulometria e no índice de vazios. Assim como é possível projetar uma vasta gama de dosagens para o concreto convencional, de modo a fazê-lo atender a determinados requisitos, o mesmo ocorre com o CCR (ANDRIOLO, 1989).

2.3.1 Massa específica

A massa específica obtida para o CCR é ligeiramente superior, cerca de 1% a 3%, à do concreto convencional com os mesmos tipos de agregados. Isto ocorre devido ao menor teor de água e de pasta da mistura e da maior energia de compactação. Entretanto, caso sejam utilizados finos de menor massa específica como “filler”, ou o teor pasta seja aumentado com adições de água ou de materiais pozolânicos, o aumento da massa específica pode não ocorrer.

Em obras executadas no Brasil, foram obtidos a massa específica de CCR de aproximadamente $2,4 \text{ t/m}^3$, em Tucuruí e Saco de Nova Olinda, e $2,6 \text{ t/m}^3$, em Itaipu. A **Tabela 1** mostra os valores de massa específica de diferentes obras em CCR.

Tabela 1 – Massa específica do CCR de diversas obras

Obra	País	Massa Específica Kg/m ³
Itaipu	Brasil	2.617
Saco de Nova Olinda	Brasil	2.361
Shimajigawa	Japão	2.460
Ohkawa	Japão	2.303
Sakaigawa	Japão	2.543
Upper Stillwater	EUA	2.400
Santa Efigênia	Espanha	2.370

Fonte: Andriolo (1989).

2.3.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão axial simples do concreto compactado é afetada principalmente pela relação água/aglomerante e pela energia de compactação.

Uma das maneiras mais eficazes de comparar valores de resistência consiste em colocá-los sob a forma de rendimento, definido como a relação entre a resistência à compressão axial simples e o consumo de aglomerante. As **Figuras 1, 2 e 3**, mostram a relação entre o consumo de cimento do concreto e a sua resistência à compressão.

O US Army Corps of Engineers (USACE), no manual que publicou sobre as propriedades principais e os procedimentos de execução do concreto compactado com rolo, coloca, em forma de gráfico, a resistência de compressão do concreto (MPa) *versus* o consumo de cimento (kg/m^3). Nas **Figuras 1 e 2** pode-se verificar claramente a influência do consumo de cimento da mistura na resistência à compressão para as diferentes idades de controle: 7 dias, 28 dias, 90 dias e 1 ano. Na **Figura 1** não se considerou o uso de material pozolânico na composição cimento. Na **Figura 2**, utilizou-se cimento com adição de 30% a 50% de material pozolânico.

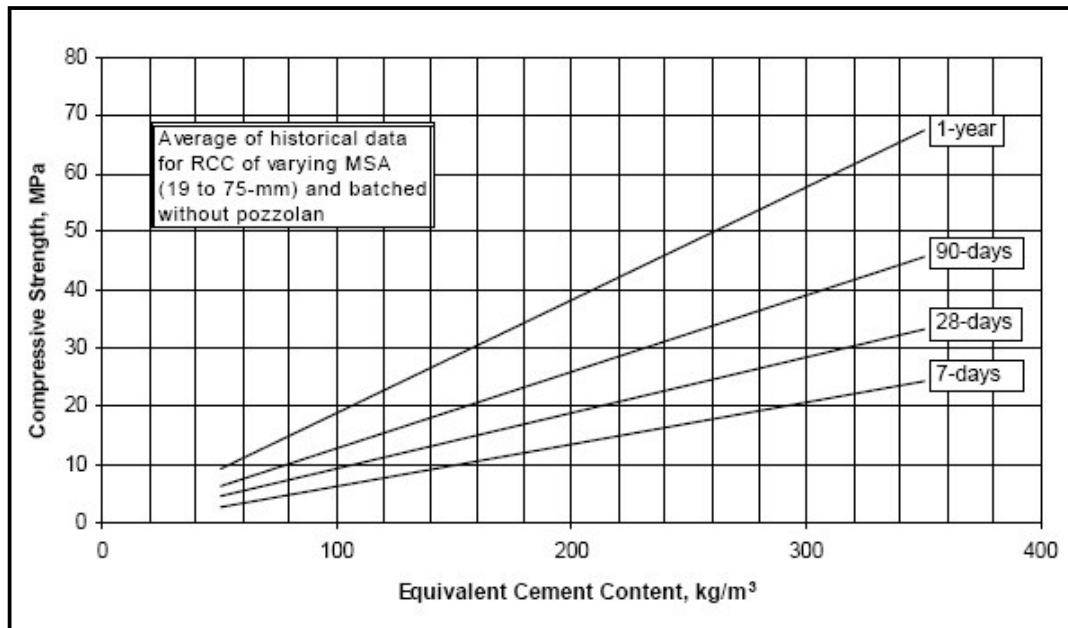


Figura 1 – Relação consumo de cimento (Kg/m^3) e resistência à compressão (MPa)
Fonte: US Army Corps of Engineers (2000).

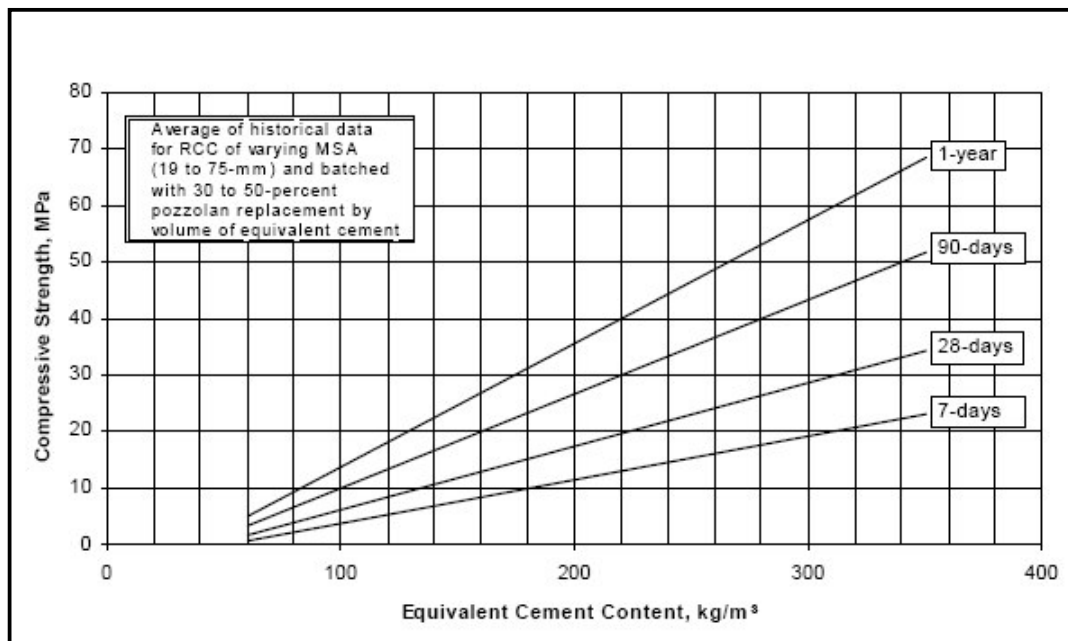


Figura 2 – Relação consumo de cimento com pozzolâna e resistência à compressão
Fonte: US Army Corps of Engineers (2000).

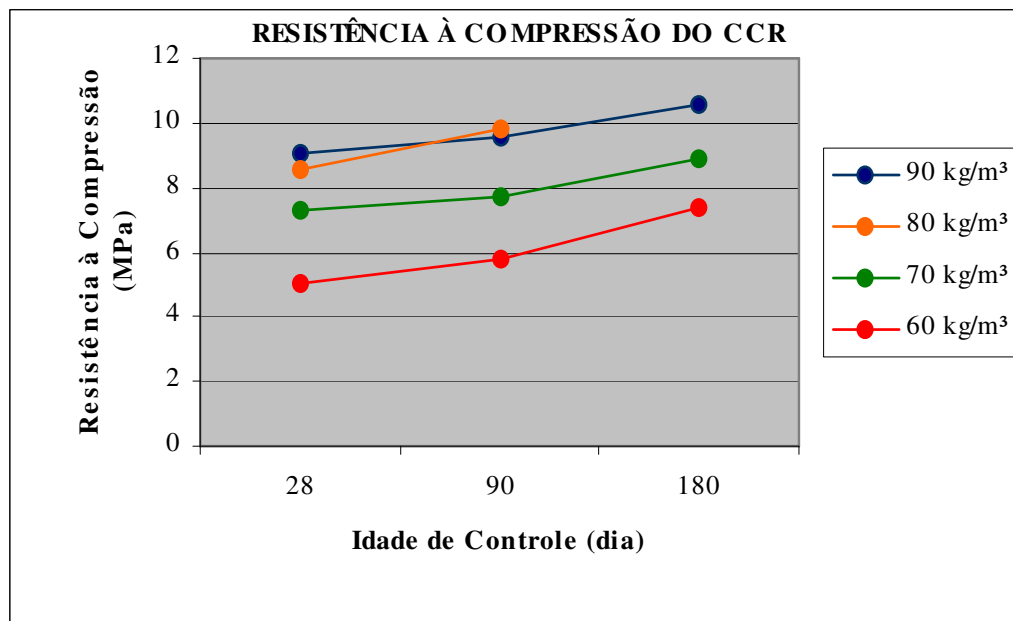


Figura 3 – Resistência à compressão para diferentes consumos de cimento
Fonte: Furnas Centrais Elétricas S.A.

As resistências obtidas para o CCR são, aproximadamente, 15% a 30% mais elevadas do que as do concreto convencional. Esta diferença é extremamente vantajosa para o concreto rolado, no que se refere às tensões de origem térmica, pois pode-se atingir um mesmo nível de resistência com um menor consumo de aglomerante e, conseqüentemente, menor intensidade de geração de calor no processo de hidratação do cimento (ANDRIOLO, 1989).

Recentes projetos de barragens em concreto à gravidade têm especificado valores de resistência à compressão do concreto compactado com rolo em torno de 8 MPa. Na UHE Dona Francisca, por exemplo, utilizou-se concreto compacto com rolo com as resistências de 8 MPa e de 9 MPa, como mostra a **Tabela 2**, de misturas de concretos para aplicação no campo.

Tabela 2 – Misturas de concreto: aplicação no campo

		TABELA		USINA HIDRELÉTRICA DONA FRANCISCA				
		DF 06 A		MISTURAS DE CONCRETO - APLICAÇÃO NO CAMPO				
DENOMINAÇÃO DA MISTURA / MATERIAIS		COMPOSIÇÃO EM kg/m ³						
		B.2.25.1	B.2.30.1	B.2.30.2	B.2.30.3	B.2.30.4	0.1.7.1	D.ARG.2
CIMENTO		97	100	93	95	90	210	376
ÁGUA		141	145	135	144	143	193	331
AREIA ARTIFICIAL		1076	1069	1085	1073	1076	861	1479
BRITA 25mm		758	690	701	693	695	1097	
BRITA 50mm		505	565	573	567	569		
SIKA - AER	(Incorporador de Ar)						0,21	
PLASTIMIXER N	(Plastificante)						1,05	
PLASTIMIXER R	(Plastificante Retardador)	1,16		1,12				1,88
PLASTIMENT FN	(Superplastificante)							
SLUMP (cm)							7 ± 1	
AR INCORPORADO (%)							4 ± 0,5	
VEBE s/peso (seg)		25+/-5	30+/-5	30+/-5	30+/-5	30+/-5		
PESO UNITÁRIO (kg/m ³)		2576	2569	2587	2571	2573	2361	2186
Fck/IDADE CONTROLE (MPa / DIA)		9/180	9/180	9/180	8/180	8/360	9/180	9/90
DIMENSÃO MÁX. CARACT.(mm)		50	50	50	50	50	25	4,8
LOCAL DE APLICAÇÃO		5	5	5	5	5	7	1 e 9
LEGENDA								
LOCAIS DE APLICAÇÃO								
1	CONCRETO DE REGULARIZAÇÃO/OLAJE INJEÇÃO/FACE DE MONTANTE							
1B	IDEM A 1 BOMBEÁVEL							
2	CONCRETO ESTRUTURAL ADUFAS							
2B	IDEM A 2 BOMBEÁVEL							
3	CONCRETO PRÉ-MOLDADOS ADUFAS E TETO DO BLOCKOUT DA BARRAGEM							
3B	IDEM A 3 BOMBEÁVEL							
4	CONCRETO PRÉ-MOLDADOS TETO GALERIA/ ESTRUTURAL CIRCUITO GERAÇÃO							
4B	IDEM A 4 BOMBEÁVEL							
5	CONCRETO COMPACTADO COM ROLO BARRAGEM/VERTEDOURO							
6	CONCRETO ESTRUTURAL CIRCUITO DE GERAÇÃO							
6B	IDEM A 6 BOMBEÁVEL							
7	ENCHIMENTO PISO TUNEL DE DRENAGEM							
8	DEGRAUS DE JUSANTE, OGIVA, BACIA DE DISSIPAÇÃO -VERTEDOURO							
8B	IDEM A 8 BOMBEÁVEL							
9	FACE DE MONTANTE							

Fonte: Consórcio Ivaí - Torno.

2.3.3 Resistência à tração

As relações entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão axial do CCR variam de maneira similar às obtidas para o concreto convencional.

O concreto rolado apresenta a resistência à tração com valores entre 5% e 20% dos valores das respectivas resistências à compressão axial simples (ANDRIOLO, 1989).

2.3.4 Resistência ao cisalhamento e ângulo de atrito

A resistência ao cisalhamento apresenta valores nas mesmas proporções com relação à compressão axial simples que as observadas para o concreto convencional.

É importante observar, com respeito ao cisalhamento, que praticamente são estabelecidos dois pares de parâmetros ao se ensaiar o cisalhamento: a tensão de cisalhamento de pico (C) e o atrito de pico (ϕ); e a tensão de cisalhamento residual (C'), existente após a ruptura e o atrito residual (ϕ').

Os ensaios de compressão triaxial têm o objetivo de determinar a envoltória de Mohr e, em decorrência, a coesão e o ângulo de atrito interno. O procedimento desse ensaio consiste, basicamente, em submeter um corpo de prova, revestido por uma membrana impermeável e flexível, a uma pressão confinante constante e a uma carga axial até a ruptura (ANDRIOLO, 1989).

2.3.5 Módulo de deformação e coeficiente de Poisson

Os principais fatores que afetam as propriedades elásticas do concreto são: a idade, o tipo de agregado e o fator água/cimento ou qualidade da pasta. O módulo de elasticidade, ou de deformação do concreto, aumenta com a idade e é governado nas idades iniciais, principalmente, pelo teor de aglomerante, após o que passa a ser afetado, grandemente, pelas características elásticas dos agregados.

A **Figura 4** mostra as variações dos módulos de elasticidade do CCR em função do consumo de aglomerante para a idade de 28 dias. Foram empregados diferentes tipos de agregados na composição do concreto: xisto (XR), granito (GR) e calcário e areia silicosa natural (TR).

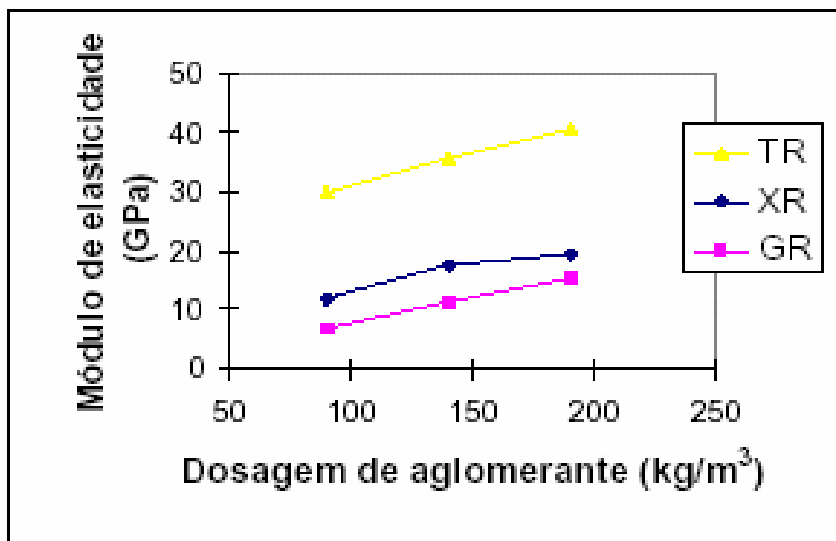


Figura 4 – Variação do módulo de elasticidade com o consumo de aglomerante
Fonte: Ribeiro; Almeida (2002).

O módulo de deformação do concreto rolado é menor que o módulo de deformação do concreto convencional nas baixas idades quando se usa baixo teor de pasta (água e cimento). A partir da idade de aproximadamente 90 dias, o módulo de deformação do CCR apresenta tendência semelhante ao módulo de deformação do concreto convencional.

Enquanto o módulo de elasticidade do concreto convencional apresenta-se com valores de 120.000 kgf/cm² a 400.000 kgf/cm² à idade de sete dias, o concreto rolado apresenta-se com valores de 60.000 kgf/cm² a 100.000 kgf/cm² (ANDRIOLO, 1989).

Os coeficientes de Poisson para o CCR não têm mostrado diferenças significativas para aqueles conhecidos para o CCV. Os valores têm se situado entre 0,15 e 0,22.

2.3.6 Deformação lenta (fluência)

A fluência é grandemente influenciada pelo módulo de deformação do agregado e pelo teor de finos da argamassa. De maneira geral, os valores obtidos para o concreto rolado têm apresentado vantagens significativas com relação aos valores de coeficiente de fluência obtidos para o concreto convencional.

O ensaio de fluência à compressão consiste, basicamente, na determinação da deformação decorrente de uma solicitação constante aplicada axialmente durante certo período. A carga constante aplicada normalmente se situa ao redor de 40% da resistência do concreto à compressão axial simples (ANDRIOLO, 1989).

2.3.7 Capacidade de alongamento

Os fatores que normalmente afetam a capacidade de alongamento são: tipo de agregado, forma das partículas, teor de cimento e tamanho máximo do agregado. Concretos com agregados britados possuem maior capacidade de alongamento, porém tal fato aumenta mais os problemas de origem térmica.

A capacidade de alongamento do concreto é conceituada como a máxima deformação apresentada antes de romper quando submetido a um esforço de tração aplicado por incrementos de cargas crescentes até a ruptura, a uma velocidade estabelecida.

A capacidade de deformação do concreto convencional tem sido determinada por ensaios de tração por flexão de vigas. As deformações são medidas por extensômetros elétricos embutidos e/ou por medidores elétricos colocados à superfície de tração.

No CCR, a dificuldade de embutir o medidor de deformação no corpo de prova reduz a opção para a medição por meio de extensômetros elétricos de resistência (ANDRIOLO, 1989).

2.3.8 Variação de volume

A ocorrência de variação de volume devido à perda d'água ou retração por secagem é significativamente menor no concreto rolado, devido ao seu menor teor de água e cimento comparativamente com o concreto convencional. A superfície está sujeita a secagem, como em todos concretos, mas há também no concreto rolado menor superfície de pasta e maior restrição, dado o maior volume de agregados.

As variações de volume do concreto são afetadas pela quantidade, tipo e qualidade do cimento. Como o teor de cimento no concreto rolado é menor do que no concreto convencional de mesma resistência mecânica, é estimado que a variação de volume do concreto rolado seja menor que a do concreto convencional.

As expansões decorrentes da reação álcalis-agregado também seriam menores, em razão do menor teor de cimento presente no concreto compactado com rolo.

As variações de volume em decorrência de fatores térmicos são influenciadas pelo teor e tipo de aglomerante e pela característica e quantidade de agregados. Considerando que o concreto rolado tem menor teor de cimento para um mesmo nível de resistência que o concreto convencional, a evolução adiabática será menor, o que implica uma variação volumétrica menor (ANDRIOLO, 1989).

2.3.9 Permeabilidade e Absorção

A permeabilidade é uma das maiores preocupações e objeto permanente de estudos dos diferentes profissionais envolvidos com o concreto compactado com rolo.

Há muito pouco tempo não se cogitava a idéia da exposição do CCR em contato com a água. Porém, com o maior desenvolvimento do concreto compactado com rolo e com a busca de custos cada vez menores, surgiu a perspectiva de utilizar o próprio CCR como paramento de montante e jusante em barragens. Atualmente, estão sendo feitos estudos, experiências e pesquisas nesse sentido. Foram realizados estudos pelo Laboratório de Concreto de FURNAS para a UHE Lajeado, onde se utilizou uma dosagem diferenciada e com a adição de alto teor de finos na proporção do concreto. Os valores dos coeficientes de permeabilidade do CCR estudados ainda não foram divulgados.

A permeabilidade e a absorção do concreto dependem muito do sistema e da distribuição de vazios, do grau de compactação, bem como do teor de pasta da mistura. A absorção do concreto rolado tem se apresentado entre 3% e 5% (ANDRIOLO, 1989).

A determinação da permeabilidade consiste, basicamente, em avaliar a passagem de um fluxo de água pelo material, com dimensões e condições conhecidas.

No conceito da Lei de Darcy, determina-se o coeficiente de permeabilidade “Kc” do concreto pela equação:

$$K_c = \frac{Q.L}{A.H}$$

Onde:

Kc: Coeficiente de permeabilidade do concreto (m/s);

Q: Vazão (m³/s);

L: Comprimento do corpo de prova (m);

H: Altura da coluna de água (m);

A: Área da seção transversal do corpo de prova (m²).

Capítulo 3

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

3.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentadas as especificações técnicas para a execução de barragens em concreto compactado com rolo. Cabe ressaltar que essas especificações apresentadas seguem a metodologia tradicional de construção do CCR em longas camadas horizontais.

As especificações técnicas estabelecem disciplinas e requisitos que contemplam o grau de certeza que se espera obter da execução da obra ou parte dela e da expectativa que se possa ter quanto à qualidade, refletida pelo controle de qualidade e de suas variações.

3.2 Classes de concreto


As diferentes classes de concretos serão definidas em função da resistência característica do projeto e da respectiva idade de controle. Para os concretos sujeitos à ação da massa de água em alta velocidade, deverão, sempre que possível, ser também definidos os valores máximos para o fator água/aglomerante e a dimensão máxima do agregado graúdo.

A dimensão máxima do agregado e a consistência do concreto serão definidas em função das dimensões das peças, do espaçamento e densidade das armaduras e das condições de lançamentos e de adensamento.

Para as construções usuais e edificações de pequeno porte, aplicam-se as Normas Brasileiras de Referência para fixar a resistência característica à compressão (f_{ck}), estimada por meio de ruptura de corpos de prova (CP).

A *Tabela 3* mostra as misturas de concreto utilizadas na UHE Dona Francisca. Especificam-se as dosagens do concreto, a sua resistência característica, a idade de controle e o local de aplicação do concreto.

Tabela 3 – Misturas de concreto: aplicação no campo.

		USINA HIDRELÉTRICA DONA FRANCISCA						
		MISTURAS DE CONCRETO - APLICAÇÃO NO CAMPO						
DENOMINAÇÃO DA MISTURA / MATERIAIS		COMPOSIÇÃO EM kg/m ³						
		B.2.25.1	B.2.30.1	B.2.30.2	B.2.30.3	B.2.30.4	0.1.7.1	D.ARG.2
CIMENTO		97	100	93	95	90	210	376
ÁGUA		141	145	135	144	143	193	331
AREIA ARTIFICIAL		1076	1069	1085	1073	1076	861	1479
BRITA 25mm		758	690	701	693	695	1097	
BRITA 50mm		505	565	573	567	569		
SIKA - AER	(Incorporador de Ar)						0,21	
PLASTIMIXER N	(Plastificante)						1,05	
PLASTIMIXER R	(Plastificante Retardador)	1,16		1,12				1,88
PLASTIMENT FN	(Superplastificante)							
SLUMP (cm)							7 ± 1	
AR INCORPORADO (%)							4 ± 0,5	
VEBE s/peso (seg)		25+/-5	30+/-5	30+/-5	30+/-5	30+/-5		
PESO UNITÁRIO (kg/m ³)		2576	2569	2587	2571	2573	2361	2186
f _{ck} /IDADE CONTROLE (MPa / DIA)		9/180	9/180	9/180	8/180	8/360	9/180	9/90
DIMENSÃO MÁX. CARACT.(mm)		50	50	50	50	50	25	4,8
LOCAL DE APLICAÇÃO		5	5	5	5	5	7	1 e 9
LEGENDA								
LOCAIS DE APLICAÇÃO								
	1	CONCRETO DE REGULARIZAÇÃO/LAJE INJEÇÃO/FACE DE MONTANTE						
	1B	IDEM A 1 BOMBEÁVEL						
	2	CONCRETO ESTRUTURAL ADUFAS						
	2B	IDEM A 2 BOMBEÁVEL						
	3	CONCRETO PRÉ-MOLDADOS ADUFAS E TETO DO BLOCKOUT DA BARRAGEM						
	3B	IDEM A 3 BOMBEÁVEL						
	4	CONCRETO PRÉ-MOLDADOS TETO GALERIA/ ESTRUTURAL CIRCUITO GERAÇÃO						
	4B	IDEM A 4 BOMBEÁVEL						
	5	CONCRETO COMPACTADO COM ROLO BARRAGEM/VERTEDOURO						
	6	CONCRETO ESTRUTURAL CIRCUITO DE GERAÇÃO						
	6B	IDEM A 6 BOMBEÁVEL						
	7	ENCHIMENTO PISO TUNEL DE DRENAGEM						
	8	DEGRAUS DE JUSANTE, OGIVA, BACIA DE DISSIPAÇÃO -VERTEDOURO						
	8B	IDEM A 8 BOMBEÁVEL						
	9	FACE DE MONTANTE						

Fonte: Consórcio Ivaí - Torno.

3.3 Materiais

- **Material cimentício** - Poderá ser utilizado como material cimentício o cimento Portland pozolânico e outros tipos de materiais; tais como: o cimento Portland comum, complementado com pozolana (*fly-ash*), e o cimento Portland de alto forno.

A escolha do tipo de cimento dá-se com base nos critérios estruturais e de durabilidade do concreto. Esses materiais cimentícios deverão obedecer às prescrições das normas NBR5735, NBR5736 e NBR5739, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

- **Agregados** – Usualmente, utiliza-se agregado graúdo, de dimensão máxima em torno de 50 mm, geralmente obtido na mesma central de britagem dos agregados de concreto convencional e, portanto, apresentando as mesmas características quanto à qualidade e à granulometria previamente estabelecidas. Com base em resultados a ser obtidos a partir da análise do material britado, de estudos em laboratório e da execução de pista experimental, será estabelecida a proporção da mistura.

No CCR, poderá ser empregada areia artificial, obtida de britagem de rochas, ou areia natural, da mesma forma que no concreto convencional.

A areia artificial que irá compor a mistura de CCR poderá ser produzida na central de britagem, prevista também para os agregados do concreto convencional, apresentando, portanto, as mesmas características do agregado miúdo. Esta areia artificial para o traço de concreto compactado com rolo será designada também como *agregado miúdo*.

A composição granulométrica dos agregados resultantes deverá ser orientada pela faixa dada pela expressão:

$$P = \left[\sqrt[3]{\frac{d}{D_{\text{máx.}}}} * 100\% \right] \pm 5\%$$

Onde:

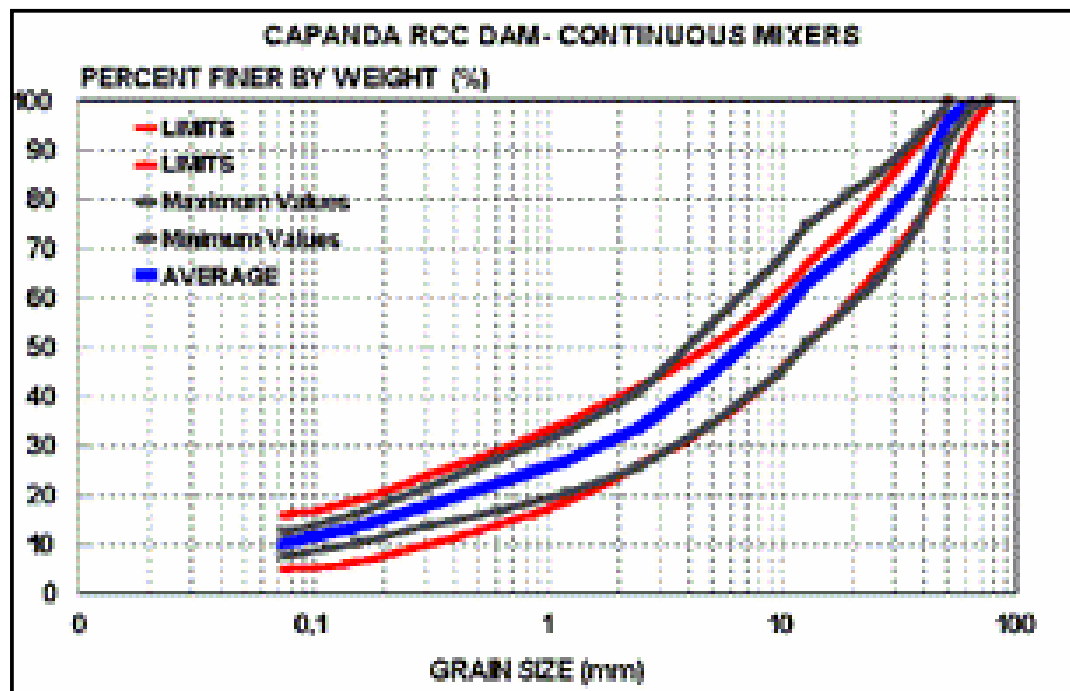
P: Porcentagem de agregado passante na peneira de malha "d" (%);

d: Tamanho da abertura da peneira (mm);

Dmáx.: Dimensão máxima característica do agregado (mm).

Atendidas as propriedades especificadas para o concreto rolado, define-se a composição granulométrica dos agregados.

Na **Figura 5**, tem-se a curva granulométrica dos agregados utilizada na barragem de Capanda, África do Sul.



*Figura 5 – Curva granulométrica utilizada em Capanda Dam
Fonte: Andriolo (1998).*

- **Água de amassamento e cura** - A água para amassamento e cura do concreto não exige requisitos diferentes da água normalmente utilizada para concretos convencionais. Sempre que possível, ela deverá ser limpa e isenta de quantidades inadmissíveis de silte, matéria orgânica, óleo, álcalis, sais, despejos de esgotos e outras substâncias nocivas.

A central de concreto deverá conter instalações para o armazenamento de água, de maneira a garantir a continuidade das operações de concretagem e cura durante eventuais acidentes ou eventos que impeçam o abastecimento normal.

3.4 Composição dos concretos e argamassa

O CCR difere do concreto convencional pelo fato de possuir uma consistência que lhe permite suportar um rolo vibratório com conteúdo de pasta adequado para compactação, por rolos vibratórios ou por outros meios externos.

As composições dos concretos e argamassa devem ser estabelecidas e otimizadas no decorrer dos trabalhos, subsidiadas, principalmente, pelos resultados da pista experimental e de ensaios tecnológicos de laboratório.

- **Características do concreto compactado com rolo** - A resistência característica à compressão do CCR deverá atingir um valor mínimo, previamente estabelecido. Normalmente, os valores de compressão situam-se em torno de 8,0 MPa (fck), porém este valor é muito característico para cada projeto envolvendo o CCR.

Na seção transversal da barragem/vertedouro, tradicionalmente, é prevista a aplicação da argamassa de ligação entre as camadas de CCR. A **Figura 6**, mostra a seção da barragem da UHE Dona Francisca, localizada no rio Jacuí, Rio Grande do Sul.

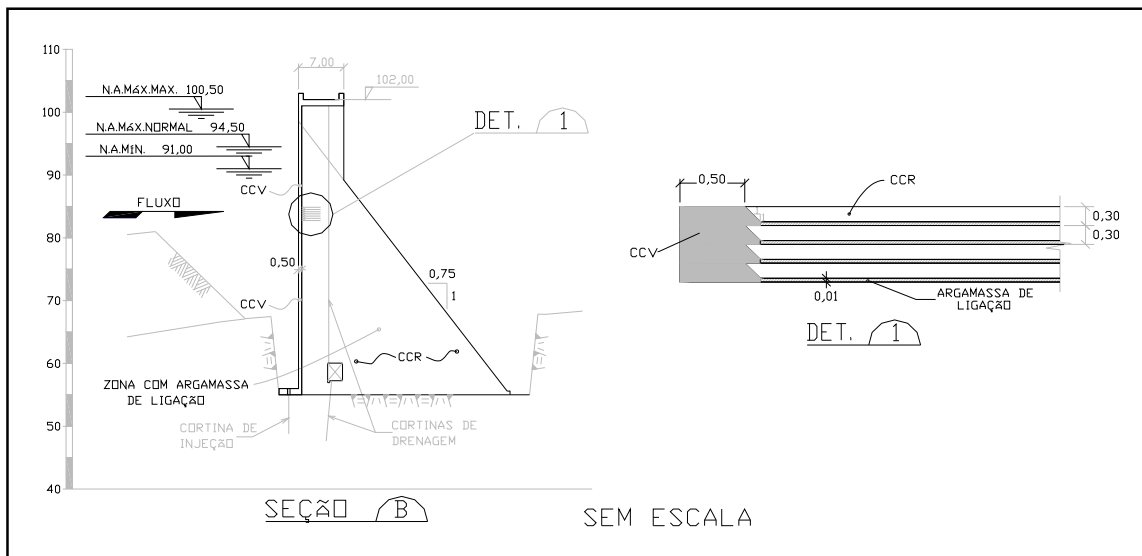


Figura 6 - Seção transversal e detalhe da barragem da UHE Dona Francisca.
Fonte: Projeto Básico UHE Dona Francisca.

A espessura final das camadas compactadas deverá situar-se entre de 0,20 m e 1,00 m. Atualmente, tem-se adotado a execução de camadas com espessuras na faixa de 0,30 m, como é o caso da UHE Dona Francisca. A adoção de espessuras das camadas de pequena dimensão tem influência positiva no calor de hidratação do concreto, e conseqüentemente, no surgimento de fissuras.

Diversos estudos de dosagens devem ser realizados em laboratório, cujos resultados permitirão definir os traços a serem empregados.

- **Concreto convencional** - O concreto convencional de regularização e de base e o concreto convencional que possa ser aplicado na face de montante e de jusante deverão ter, preliminarmente, as resistências características f_{ck} e as idades de controle definidas.

Em barragens nas quais o núcleo é executado em concreto rolado de baixo consumo de aglomerante e o paramento de montante em concreto convencional, pode-se usar uma camada de concreto convencional, adensado com vibradores de imersão, de espessura variável, com coeficiente de permeabilidade conhecido. Esta espessura é dimensionada

para que não ocorra contato da água de percolação com o concreto compactado com rolo, situado no núcleo, para o período de vida útil da obra.

Sem dúvida, um método promissor e importante para a execução dos paramentos de montante e de jusante é o emprego do próprio CCR aplicado diretamente como elemento de estanqueidade. No Capítulo 5 (*Tendências Futuras*) será dado maior enfoque ao assunto.

- **Argamassa de ligação** - A argamassa a ser utilizada entre as camadas de CCR deve ter, preliminarmente definida, a relação cimento: areia, em peso, geralmente variando de 1:4 a 1:5.

Atualmente, vêm sendo desenvolvidas metodologias construtivas que eliminam parcialmente a argamassa de ligação entre as camadas de concreto compactado com rolo, como ocorreu durante a construção da barragem de Jiangya, na China, e, mais recentemente, na UHE Lajeado no Brasil.

3.5 Central de concreto compactado com rolo

Uma exigência fundamental para a escolha de um sistema de produção de concretos é que o produto possua consistência e qualidade.

O método, ou processo, de mistura deve ser capaz de umidecer toda a superfície dos agregados com pasta de cimento e produzir uma mistura homogênea. Esses fatores determinam o tempo de mistura e, conseqüentemente, tem influência direta na capacidade de produção da central de concreto. As instalações para produção de CCR devem possibilitar uma mistura homogênea dos componentes, sem segregação, e no tempo de amassamento especificado.



*Figura 7 – Central de concreto da UHE Lajeado.
Fonte: Consórcio Construtor Lajeado*

3.6 Execução do concreto compactado com rolo

- **Formas** - Uma importante característica das obras em concreto compactado com rolo é a menor utilização de formas, se comparadas com as obras em concreto convencional.

Os tipos de formas normalmente utilizados são as formas trepantes, os blocos pré-moldados e os painéis metálicos. As formas devem ser projetadas de maneira a não interferir no lançamento do concreto rolado e ser executadas em conformidade com os locais de aplicação.

- **Arranque da fundação** - Durante o preparo da fundação, as escavações devem ser feitas até se atingir níveis adequados de fundação, do ponto de vista geomecânico.

Em todas as superfícies sobre as quais deverá ser lançado concreto compactado com rolo deve ser feita uma limpeza, retirando-se todo material solto e insano. Todas as depressões e sulcos da rocha de fundação devem ser cuidadosamente limpos e isentos de impurezas e água, e preenchidos com concreto de regularização (concreto dental), que será adensado por vibrador de imersão.

Nas áreas relativamente planas da fundação, deverá ser lançada uma camada de concreto convencional de regularização, com espessura de cerca de 0,30 m. Nas áreas muito planas e regulares, quando a concretagem for executada imediatamente antes do lançamento do CCR, esta espessura poderá ser reduzida. Na **Figura 8**, pode-se ver a preparação da fundação, com o lançamento do concreto de regularização (dental) na UHE Lajeado.



Figura 8 – Preparação da fundação na UHE Lajeado.
Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland.

- **Transporte** - O concreto a ser compactado deve ser transportado, da central de concreto até o local de lançamento, o mais rápido possível, sem que ocorra contaminação, secagem e segregação. O tempo entre o início da mistura e o fim da compactação não deve ser superior a 40 minutos.

O transporte do concreto poderá ser realizado de forma contínua: correia transportadora e/ou bombeamento; e de forma intermitente: caminhões basculantes, *dumpcrete* e caminhões fora de estrada.

Optando-se pelo uso de correias transportadoras, estas deverão ser operadas com velocidades adequadas, de maneira a atender às exigências da produção, sem que haja a segregação dos materiais. As correias devem contar com dispositivos para proteger o concreto transportado, evitando, assim, a secagem pelo vento ou pelo sol, ou a saturação pela ação das chuvas.

Sendo utilizados caminhões para o transporte do concreto a ser compactado, obrigatoriamente, antes de entrarem na praça de lançamento para descarga do concreto, eles deverão ter suas rodas lavadas, para evitar que as superfícies de concretagem sejam contaminadas. O trecho da pista de acesso onde será feito o controle de lavagem das rodas dos caminhões pode ser forrado com fragmentos de rocha ou de cascalho para facilitar a drenagem.

Possíveis contaminações nas pistas de acesso ao local de lançamento devem ser eliminadas antes da chegada de novo carregamento de concreto compactado com rolo.

Qualquer segregação resultante da queda vertical, quando a caçamba do caminhão estiver inclinada, deve ser corrigida manualmente ou retrabalhando-se os materiais de forma efetiva durante o espalhamento.

Os veículos devem ser mantidos em boas condições de operação e não devem deixar nas praças de lançamento óleo, graxa ou qualquer outro material inconveniente.

Os veículos devem ser manobrados sem procedimentos bruscos que danifiquem a camada de CCR sobre a qual estejam trafegando. No caso de uma camada ser danificada pela operação do veículo, a superfície danificada deve ser limpa e o material danificado retirado.

O transporte de concreto convencional para as praças de lançamento de CCR pode ser feito por caminhão betoneira.

- **Lançamento do concreto de regularização** - Não é indicado o lançamento do concreto rolado em contato direto com a fundação em rocha, devendo ser utilizada uma camada de concreto convencional de regularização (concreto dental). No lançamento desta camada de base, podem ser utilizados guindastes providos de caçamba, caminhões betoneira ou outro método proposto.

- **Lançamento do concreto compactado com rolo** - O lançamento do concreto consistirá da descarga por meio de correias transportadoras providas de anteparos para controlar a segregação ou por descarga direta dos caminhões basculantes, diretamente nas frentes de concretagem, como mostra a *Figura 9*.

Ocorrendo alguma segregação durante a descarga, tal disfunção deve ser corrigida por paleamento.

A capacidade dos equipamentos e o ritmo construtivo a ser colocado em prática devem atender ao planejamento construtivo, aos requisitos especificados e às exigências do projeto.



***Figura 9 – Lançamento do CCR realizado por caminhão basculante.
Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland***

A espessura final das camadas de concreto compactado com rolo tem se situado na faixa de 20 cm a 1,00 m. A maioria das obras em CCR utilizou espessuras de camadas entre 0,20 cm e 0,30 cm. Deve-se considerar que a altura da camada tenha no mínimo 3 (três) vezes o diâmetro máximo do agregado. No caso de utilização de agregados com diâmetro máximo de 50 mm (largamente empregado em barragens de concreto), a altura da camada deve ter no mínimo 15 cm.

O concreto rolado pode ser descarregado sobre a camada que estiver sendo espalhada, em subcamadas, até se obter uma camada nivelada, com a espessura final especificada em projeto.

Para manter a qualidade da obra, o concreto não deve ser lançado sobre uma camada que tenha sido considerada suspeita e que esteja sendo analisada para fins de aprovação ou rejeição.

- **Interrupções de lançamentos em períodos chuvosos** - Nas superfícies em que o lançamento for interrompido devido a fortes chuvas inesperadas, o concreto compactado com rolo lançado deve ser imediatamente compactado. Como medida de proteção adicional, a camada deve ser protegida da chuva com emprego de coberturas impermeáveis, como por exemplo, o uso de lonas plásticas.

Quando uma camada não compactada receber chuva forte durante o processo de execução, estando sem a devida proteção, todo o concreto lançado não compactado deve ser removido.

O CCR não deve ser lançado durante o período chuvoso nas seguintes hipóteses:

- ocorrência de chuvas torrenciais capazes de lavar a superfície dos agregados do concreto recém-compactado;
- penetração de água pluvial na massa do concreto recém-lançado e ainda não compactado, modificando a umidade da mistura em mais de 1%; ou
- precipitações superiores a 7 mm/h (0,7 mm em 6 minutos).

A produção deve ser paralisada sempre que alguma água superficial livre comece a se acumular sobre o concreto ou, após a compactação, quando ocorrer formação de trilhas ou qualquer avaria que possa ocasionar perda da qualidade do concreto.

- **Intervalo e preparação das juntas de construção** - O intervalo máximo entre os lançamentos de camadas de CCR deve ser definido a partir da pista experimental. Em princípio, 4 horas para o período diurno e de 8 horas para o noturno.

A **Tabela 4** mostra o intervalo de tempo entre a execução de duas camadas consecutivas de concreto rolado. Esses valores devem ser verificados a cada novo projeto.

Tabela 4 - Critérios usuais de lançamento e tratamento de juntas.

Intervalo de Tempo Entre Camadas Consecutivas	Zona Onde se Prevê Argamassa de Ligação	Zona Onde Não se Prevê Argamassa de Ligação
Menos que 4 horas (diurno) e 8 horas (noturno)	A nova camada pode ser lançada sem qualquer tratamento.	
Entre 4 horas (diurno) e 24 horas ou 8 horas (noturno) e 24 horas.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Limpeza da superfície com jato de ar úmido. 2. Lançamento da argamassa de ligação. 3. Lançamento da nova camada de CCR. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Limpeza da superfície com jato de ar úmido. 2. Lançamento da nova camada de CCR.
Mais de 24 horas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Preparação da superfície com escova giratória ou jato de ar e água. 2. Lançamento da argamassa de ligação. 3. Lançamento da nova camada de CCR. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Limpeza da superfície com jato de ar. 2. Lançamento da nova camada de CCR.

Fonte: Especificações técnicas da UHE Dona Francisca.

- **Argamassa de ligação** - A argamassa de ligação com consistência bem plástica entre camadas, onde prevista, deve ser lançada imediatamente antes do concreto, espalhada com rodo ou projetada por via úmida, numa espessura em torno de 1,0 cm. O espalhamento da argamassa deverá ser feito de modo que sua superfície não fique exposta por muito tempo, devendo-se lançar a camada sobrejacente de CCR no menor espaço de tempo possível.

A exposição da argamassa durante o dia ficará limitada a 20 minutos e durante a noite a 40 minutos, dependendo da temperatura e da presença de vento. Se o tempo de exposição, até a cobertura pelo CCR, supere ao tempo indicado, a argamassa deverá ser removida. Neste caso, a superfície deverá ser novamente tratada, e nova camada de argamassa de ligação deverá ser lançada.

Um sistema adequado de lançamento de argamassa é o que utiliza um circuito independente, provido de uma bomba de argamassa projetada para reduzir a área de espalhamento, com as vantagens de:

- eliminar o risco de uma exposição prolongada, pois o seu lançamento será feito em paralelo com o concreto e
- evitar que as rodas do caminhão basculante penetrem na área argamassada por ocasião do lançamento.

O sistema a ser efetivamente usado deve ser testado na pista experimental e previamente selecionado.

O trabalho deve ser interrompido quando houver precipitação pluviométrica que venha prejudicar o lançamento do CCR, devendo o material recém-lançado ser protegido com manta de plástico.

A superfície do concreto rolado, ao receber a argamassa, deve estar em condições saturada seca, devendo as poças de água ser removidas por equipamentos de aspiração ou outro método de remoção.

- **Concreto convencional** - Em barragens cujo núcleo é executado em CCR e o paramento de montante em concreto convencional, pode-se usar uma camada de concreto convencional, adensado com vibradores de imersão, de espessura definida, que possua coeficiente de permeabilidade conhecido.

- **Lançamento de concreto compactado com rolo junto à forma** - Nos locais em que o concreto rolado for lançado junto à forma como nos paramentos e nas galerias, os seguintes cuidados devem ser tomados:

- o rolo vibratório não deverá compactar o concreto junto à forma, observando-se um espaçamento em torno de 0,30 m;
- a camada será dividida em duas subcamadas; e
- a compactação da subcamada, com largura de aproximadamente 0,30 m, deve ser realizada com vibrossoquetes e complementada com rolo vibratório manual ou de pequena dimensão.

• **Espalhamento do concreto** - O espalhamento do concreto, usualmente, é feito com trator de esteiras (tipo Bulldozer) ou equipamentos espalhadores do tipo usado em construções de pavimentos e executado de forma a tornar a superfície a mais plana possível.

Na **Figura 10**, vê-se o espalhamento do concreto rolado por de trator de esteiras na UHE Lajeado.



Figura 10 - Espalhamento do CCR realizado por trator de esteiras.
Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland.

Equipamentos modernos de espalhamento são dotados de controladores de níveis a *laser*, facilitando o nivelamento das superfícies de concreto. Outra forma prática de produzir uma superfície plana consiste em estabelecer referências topográficas. Tais referências são marcadas com tinta bem visível nas formas de montante e jusante. Nessas referências, poderão ser marcados o número das camadas, a elevação ou, mesmo, outras observações de interesse (nível de galeria, dreno horizontal, entre outras informações).

De modo geral, o equipamento de espalhamento deve operar somente com o material não compactado, não sendo permitido que manobre sobre o concreto após a sua compactação, para não danificá-lo. Equipamento especial deve ser previsto para descarga e espalhamento em áreas confinadas, como nas partes irregulares das fundações e outros locais.

O espalhamento deve ser efetuado de maneira a não causar segregação, com equipamento de capacidade de produção compatível com a quantidade de material descarregada pelo equipamento de transporte.

Se houver paralisação para a mudança de forma, a última camada deve estar ligeiramente abaulada, com declividade de 1% a 2% para as laterais, para evitar acúmulo de água sobre a superfície de concreto.

A camada de concretagem, dependendo das dimensões da praça de lançamento, será composta por faixas adjacentes, cuja largura não deve ser inferior a 1,8 vez a largura do cilindro do rolo vibratório.

O intervalo de tempo entre o lançamento de duas faixas adjacentes não deve ultrapassar 60 minutos. No caso de este limite ser ultrapassado por qualquer contingência na produção ou transporte do concreto, a última faixa deve ser semipreparada com uma passada de rolo sem vibração para fechar a superfície. Se a concretagem prosseguir, a costura entre as faixas em questão será feita normalmente. Se a interrupção se aproximar de 4 horas no turno diurno e 8 horas no turno noturno, a rampa deve ser completada.

O comprimento da faixa a ser compactada, preferencialmente, não deve ser inferior a 4 ou 5 vezes o do equipamento compactador, para facilitar a diversas manobras necessárias na praça de lançamento.

A espessura da camada no espalhamento deve exceder em torno de 8% a 10% a espessura final da camada compactada, ou como verificado anteriormente na pista experimental.

- **Adensamento** - A compactação, ou adensamento, do CCR pode ser efetuada por uma grande variedade de tipos de rolos vibratórios, inclusive os usuais nos serviços de compactação de materiais granulares, sendo que os rolos vibratórios autopropelidos são mais adequados e de operação mais simples. Condições operacionais, força de compactação, dimensões nos tambores, frequência, amplitude e velocidade de translação são parâmetros fundamentais que devem ser considerados na escolha do equipamento. Normalmente, a velocidade de translação do rolo vibratório situa-se entre 1 km/h e 3 km/h.



*Figura 11 – Tipos de rolos vibratórios em Watershed Dam.
Fonte: RCC Newsletter – Summer 2001, v. 17, n. 1.*

Podem ser utilizados rolos de compactação manual e adensadores manuais de placa, nos paramentos da barragem e do vertedouro, paredes das galerias de drenagem, juntas de contração induzidas e ao redor de peças embutidas e dos poços de aeração. Essa

compactação, com rolos vibratórios manuais, vibrossoquetes ou placas, deve assegurar os mesmos resultados obtidos com os rolos compactadores.

A compactação deve ser iniciada tão logo a camada do concreto recém-lançado tenha sido regularizada e liberada para a compactação.

O número de passadas será determinado de acordo com as características do rolo vibratório, segundo os testes efetuados na pista experimental. Este número deverá ser suficiente para que o concreto compactado com rolo atinja uma massa específica, em torno de 97% (dependendo do projeto), da massa específica teórica (soma do peso de todos os materiais utilizados, em um determinado traço, para produzir um metro cúbico de concreto). A compactação excessiva pode ser prejudicial e deve ser evitada para que não ocorra redução da densidade do concreto compactado com rolo, conforme mostra os gráficos das **Figuras 12 e 13**. Na **Figura 14**, têm-se curvas onde são traçados graus de compactação (massa específica) *versus* o teor de umidade. Na **Figura 15**, são traçadas curvas levando-se em consideração o número de passadas do rolo vibratório e o recalque observado no material decorrente do adensamento.

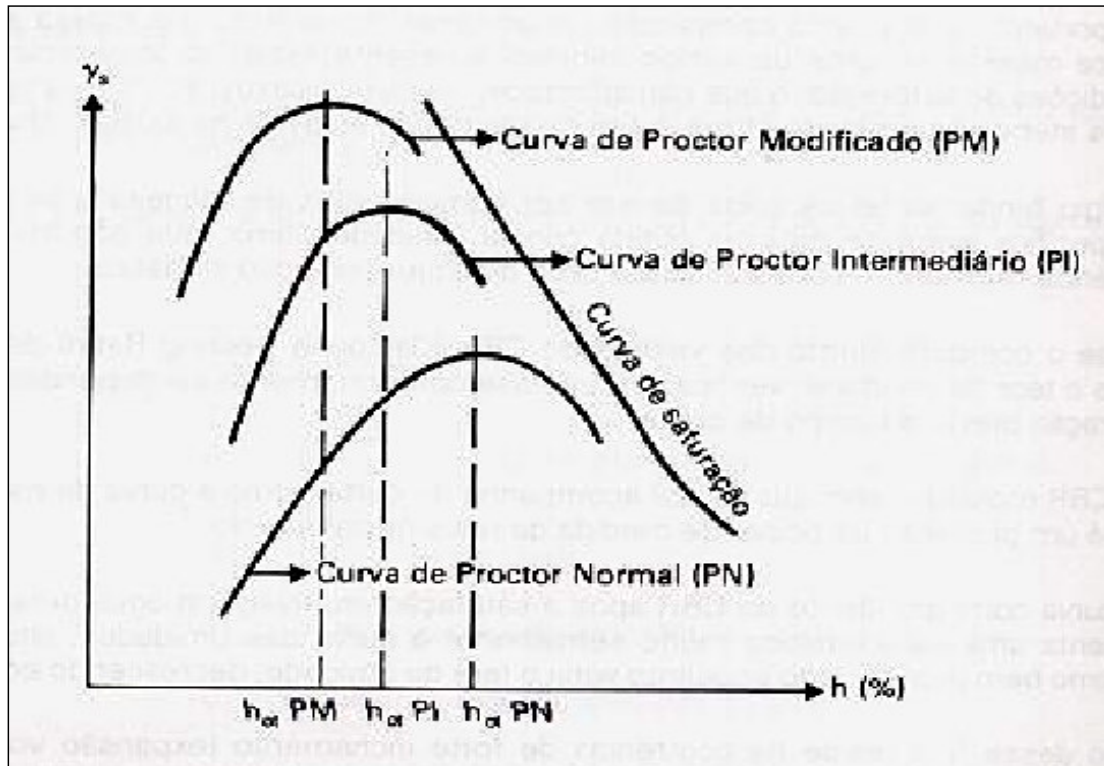


Figura 12 – Curva de compactação.
Fonte: Ricardo, et al., (1990).

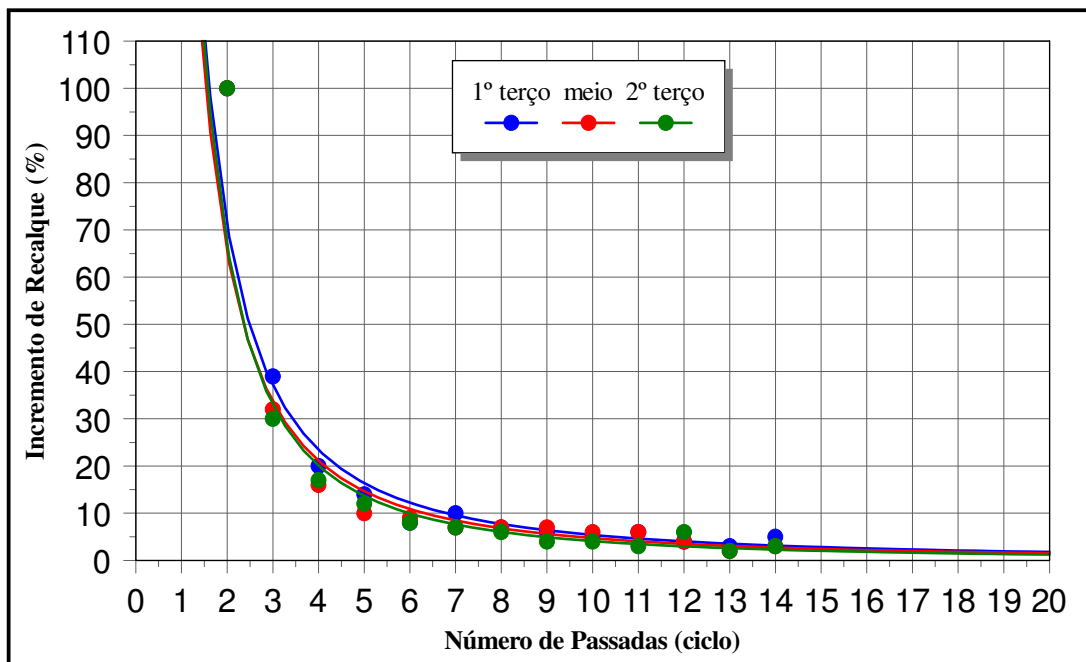


Figura 13 – Curva de controle de compactação da UHE Cana Brava
Fonte: Furnas Centrais Elétricas S.A.

A condição ideal da compactação do CCR aparece, visualmente, quando a superfície apresenta um filme de água ou um brilho tênue e o rolo vibratório mostra-se semimolhado. Esta condição é uma forma indireta e simples do controle de umidade do CCR.



*Figura 14 – Compactação com o rolo vibratório na UHE Lajeado.
Fonte: Furnas Centrais Elétricas S.A.*

O procedimento de compactação, a ser aferido na pista experimental, prevê que as duas primeiras passadas sejam realizadas sem vibração e as demais com rolo vibrando.

As características do rolo vibratório, fornecidas pelo fabricante, principalmente peso e frequência, devem ser previamente aferidas e verificadas periodicamente.

- **Cura** - Após a compactação, deve ser mantida uma neblina com ar e água, até o início da cura normal do CCR, que deverá seguir os procedimentos adotados para o CCV.

O umedecimento da camada, que pode ser realizada por meio de nebulizadores, por aspersão com caminhão-pipa ou por vaporização em “espingarda”, deve ser permanente, evitando-se que a mesma fique alagada ou encharcada. Não devem ser aplicados jatos de

água de forma concentrada ou sob pressão, para evitar a erosão da superfície fresca do concreto compactado com rolo. Qualquer superfície que vier a ser danificada por erosão e que exponha o agregado graúdo deve ser tratada com argamassa de ligação.

Nos períodos de chuva intensa, as proteções do concreto não enrijecido devem ser feitas por lonas plásticas ou materiais impermeáveis.

- **Juntas de contração** - As juntas de contração plenas, no corpo da barragem e do vertedouro, serão executadas para compatibilizar a capacidade de produção e/ou requisitos de projeto. Atualmente tem-se adotado juntas de contração distanciadas entre 15 m e 30 m.

As principais funções das juntas de contração consistem em limitar as zonas restritas da barragem e dar certa liberdade de deformação à estrutura. Na **Figura 15**, mostra-se a seção longitudinal da UHE Dona Francisca, com as juntas de contração posicionadas a cada 20 m (típico) ao longo da seção do barramento.

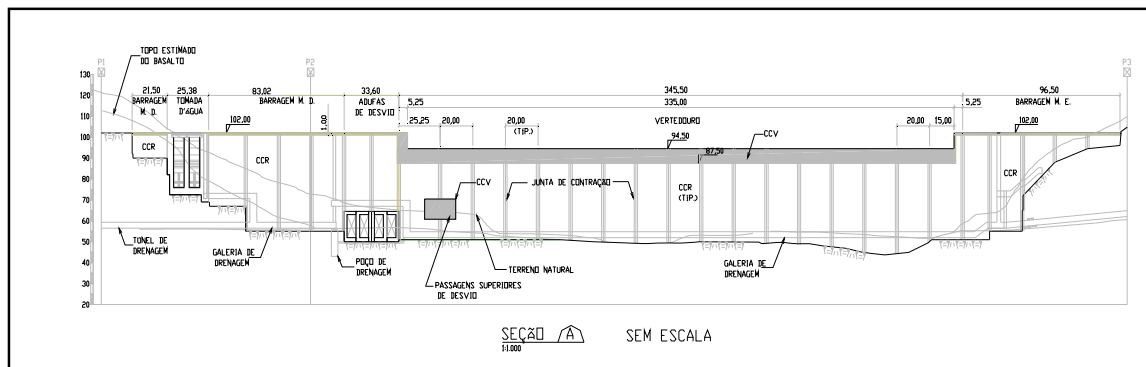


Figura 15 - Espaçamento das juntas de contração na UHE Dona Francisca.
Fonte: Projeto Básico - UHE Dona Francisca.

- **Juntas de construção** - As juntas de construção podem ser programadas ou eventuais, podendo ser pontos fracos numa barragem. As juntas eventuais, ou junta fria,

ocorrem quando o intervalo de tempo entre as concretagens excede o limite e o concreto atinge a pega. Para evitar o surgimento de juntas frias, devem ser analisadas utilizações de aditivos (como retardador de pega) na dosagem do concreto. As juntas de construção programadas podem limitar as praças de lançamento e reduzir volumes de execução e ou jornada de trabalho. Devem, se possível, coincidir com as juntas de contração projetadas para a estrutura.

3.7 Execução da junção entre o CCR e o CCV

A junção entre o concreto compactado com rolo e o concreto convencional vibrado, prevista para a barragem, nos taludes da rocha de fundação, nas ombreiras e demais pontos, deve ser executada obedecendo ao seguinte procedimento:

- lançar o CCV próximo da forma ou da rocha de fundação com volume compatível com a largura final especificada e a altura final da camada de compactação;
- lançar o CCR com altura adequada para a camada compactada, encostando-o no CCV;
- consolidar o concreto convencional por meio de vibrador de imersão antes que o mesmo complete 1 hora desde sua produção na central, eliminando totalmente os vazios;
- considerar que a vibração no concreto rolado deverá unir os dois tipos de concreto, fazendo uma junção o mais solidária possível. Os vibradores de imersão devem ser introduzidos verticalmente e retirados vagarosamente, em intervalos variáveis de 0,30 m a 0,40 m;
- executar a compactação do CCR com o número de passadas prescrito, no sentido paralelo ao da junção com o concreto convencional;
- após a compactação com o rolo vibratório, realizar a revibração do concreto convencional, forçando o vibrador de imersão contra o CCR; e

- antes que o CCV entre em início de pega, compactar sua junção com o concreto rolado, com rolo vibratório pequeno ou placa vibratória, no sentido da junção, fazendo com que o nível seja o mesmo para os dois concretos.

3.8 Drenagens e galerias

O maciço de concreto rolado, sempre que necessário, deve contar com sistemas de drenagem internos para assegurar a coleta e condução controlada dos fluxos de água percolados e também para que sejam feitas inspeções no corpo da estrutura. É importante que o projeto seja desenvolvido no sentido de otimizar o traçado das galerias, evitando aquelas inclinadas que possam ser substituídas por poços interligando as mesmas.

A implantação de galerias de drenagem em barragens com altura inferior a 40 m é um assunto bastante discutido por especialistas, Já para grandes barragens, o seu uso é indispensável. Na **Figura 16** vê-se a seção típica de uma barragem com os diagramas de esforços (subpressão) atuantes para barragens com e sem a adoção de galerias de drenagem. As galerias de drenagem podem ser construídas com a utilização de formas metálicas, chapas de madeira, painéis pré-moldados, etc.

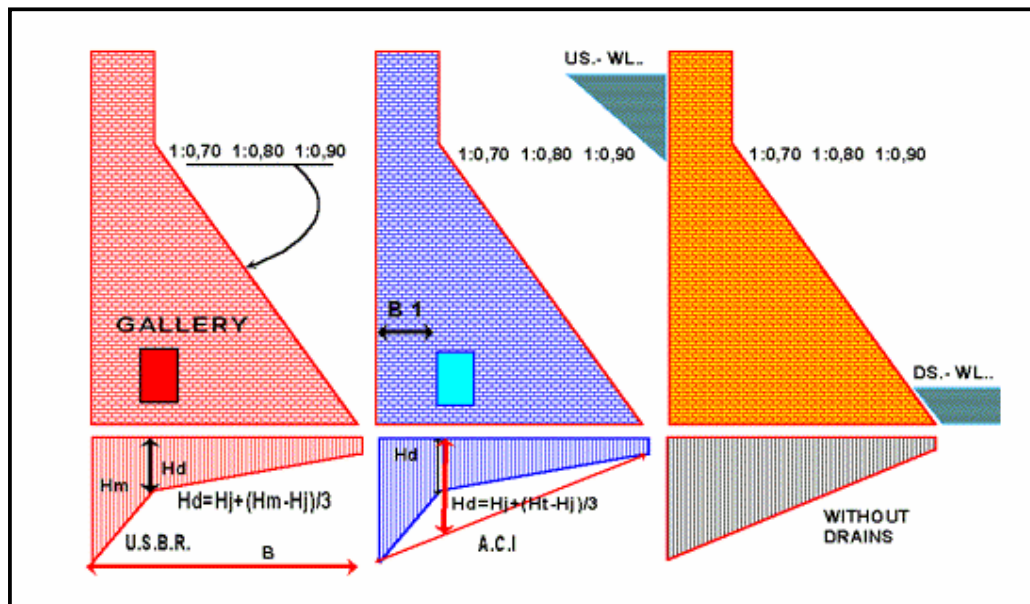


Figura 16 – Diagramas de tensões para barragem com e sem galeria de drenagem
Fonte: Andriolo (1998).

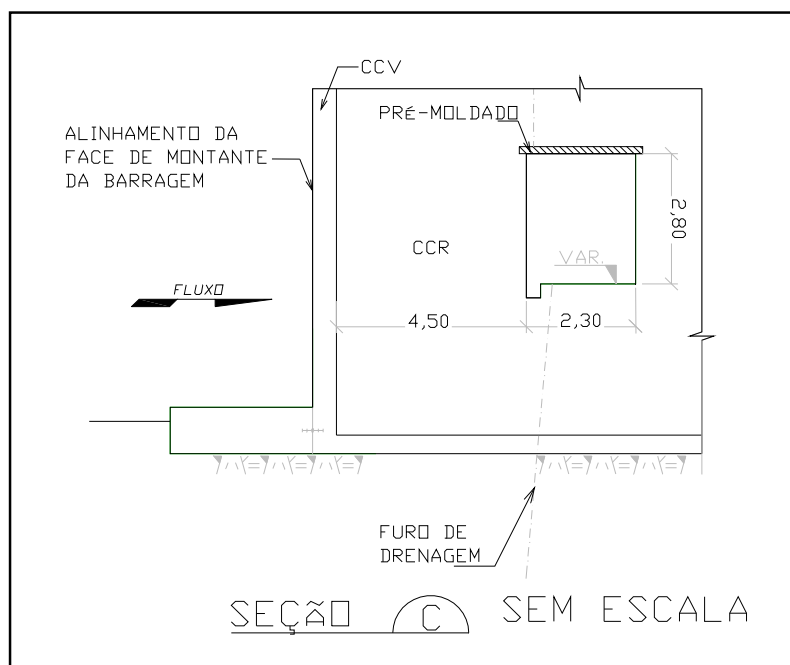


Figura 17 – Detalhe da galeria de drenagem na UHE Dona Francisca.
Fonte: Projeto Básico – UHE Dona Francisca.

3.9 Ensaios e controle

- **Central de britagem** - Os ensaios de agregados serão efetuados de conformidade com as normas aplicáveis da ABNT ou outras. Devem ser executados os ensaios de controle de rotina nos agregados, nos diversos estágios das operações de processamento, transporte, empilhamento, recuperação e mistura.

- **Central de concreto** - Os ensaios mais freqüentes realizados na central de concreto são:

- tempo de vibração e teor de umidade;
- moldagem de corpos de prova (para ensaios de resistência característica à compressão e determinação da massa específica).

- **Praça de lançamento** – Na praça de lançamento, há:

- teor de cimento (após espalhamento do CCR e imediatamente antes de a compactação será retirada uma amostra, para determinação em laboratório do teor do cimento);
- densidade *in situ* (o número de passadas do rolo compactador deverá ser definido durante a execução da pista experimental, de tal forma a satisfazer às exigências da massa específica úmida do CCR. A massa específica úmida do concreto rolado deverá ser determinada com densímetro nuclear ou outro processo); e
- extração de testemunhos (por meio de sondagens rotativas para a execução de ensaios de resistência à compressão, massa específica e permeabilidade, mediante ensaios de perda d'água).

3.10 Pista experimental

Antes do início dos trabalhos definitivos, deve-se executar uma pista experimental, cujos objetivos principais são:

- ajustar as dosagens definidas para uso, quanto à trabalhabilidade, umidade e densidade;
- conhecer o desempenho dos equipamentos, principalmente do rolo vibratório e do tipo de compactador a ser utilizado nas regiões não acessíveis ao rolo vibratório;
- definir o número de passadas do rolo vibratório em função da trabalhabilidade e densidade requeridas;
- investigar intervalos de lançamentos sucessivos, diurno e noturno, em termos de tempos de exposição admissíveis;
- investigar situações de juntas de concretagem quanto a aderência e tipos de tratamento;
- testar o método executivo de juntas induzidas;
- investigar alternativas construtivas, tais como: lançamento e adensamento do concreto rolado junto das formas, lançamento e adensamento do concreto rolado e concreto convencional junto à rocha, nas ombreiras; e
- extrair testemunhos para: avaliar a qualidade do CCR e do CCV, por meio da caracterização de suas propriedades mecânicas, elásticas e de permeabilidade, e avaliar a aderência entre camadas e alternativas de construção investigadas.



*Figura 18 – Pista experimental de campo da barragem Olivenhain – USA.
Fonte: RCC Newsletter Summer 2000, v. 16, n. 1.*

A pista experimental de campo servirá também como área de prática, treinamento e orientação da equipe envolvida nesses trabalhos.

Atualmente, estão sendo desenvolvidos ensaios em pistas experimentais executadas em laboratório. Nas **Figuras 19 e 20**, vêem-se detalhes da pista experimental do Laboratório de Concreto de FURNAS, localizada em Goiás. Tais figuras referem-se aos estudos realizados para a UHE Lajeado.



Figura 19 – Pista experimental CCR do laboratório de concreto de Furnas – Goiânia
Fonte: Furnas Centrais Elétricas S.A.

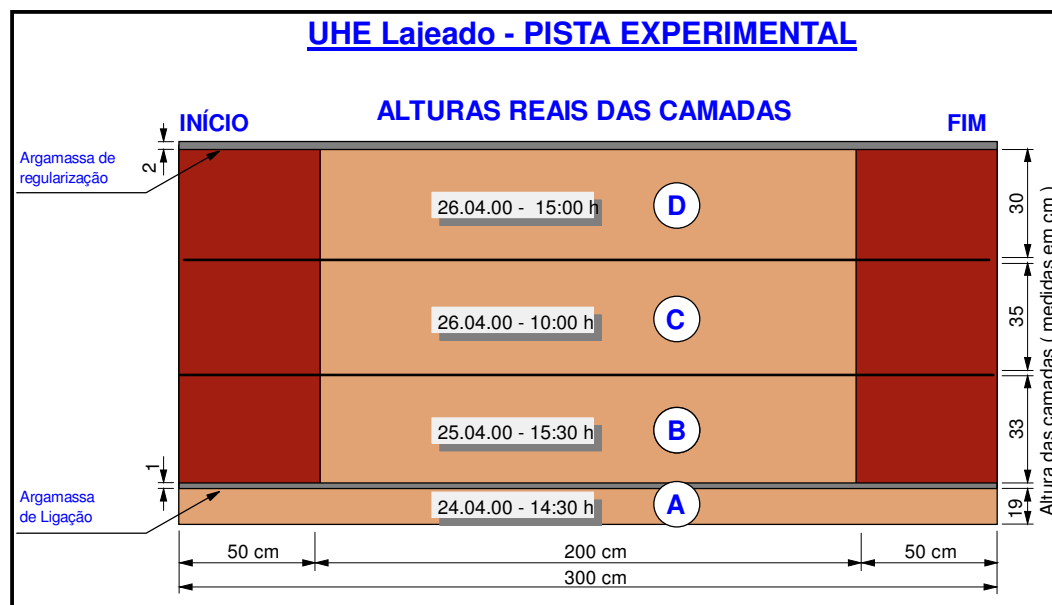
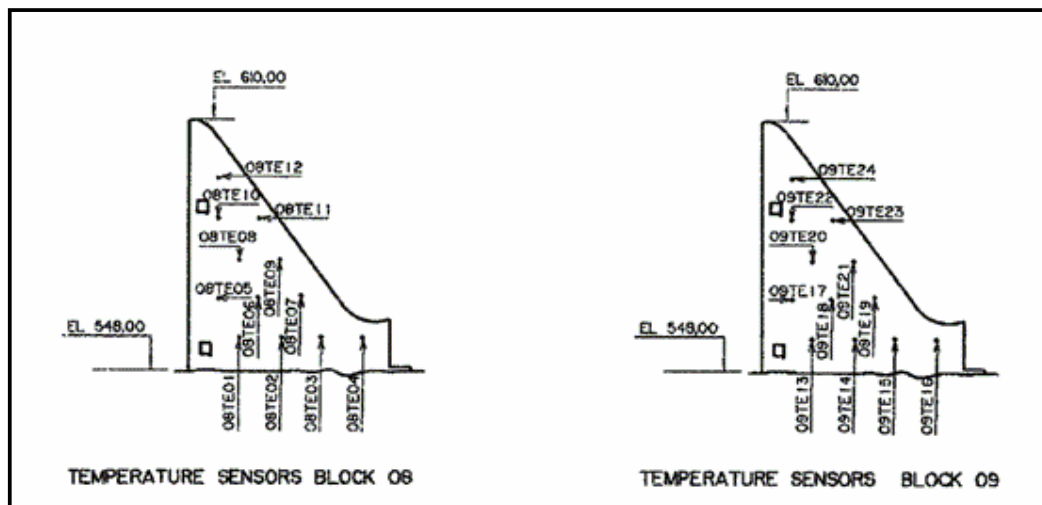


Figura 20 – Croqui da pista experimental de laboratório da UHE Lajeado
Fonte: Furnas Centrais Elétricas S.A.

3.11 Instrumentação

Os instrumentos devem ser instalados, quando necessário, em locais selecionados ao longo da barragem e/ou fundação, de modo que as medições possam ser feitas durante a construção/operação, para verificar o comportamento das estruturas. Nas estruturas de concreto, poderão ser monitoradas:

- as variações de temperatura no CCR, por meio de uma rede de termômetros elétricos;
- a ocorrência de pressões de percolação no concreto rolado, particularmente nas juntas entre as camadas, por meio de piezômetros;
- a medição de movimentos nas juntas do concreto compactado com rolo e entre a face de montante, de concreto convencional, e a estrutura de concreto rolado, por meio de extensômetros embutidos no concreto; e
- a medição das vazões de infiltração através da face de montante.



*Figura 21 – Sensores de temperatura na barragem de Salto Coxias
Fonte: Andriolo (1998).*

Capítulo 4

CARACTERÍSTICAS GERAIS

4.1 Introdução

Este capítulo trata das características gerais do concreto compactado com rolo. Nele, são abordados assuntos relacionados ao planejamento, ao custo, aos diferentes tipos de aplicações e às razões de emprego do CCR diante dos demais tipos de barragens.

4.2 Planejamento

O planejamento e a logística para construções em concreto compactado com rolo são consideravelmente diferentes daqueles verificados para o concreto convencional, pois, em lugar da construção vertical em blocos, o lançamento, no caso do CCR, segue um fluxo horizontal, como uma obra de terraplenagem.

Quando ocorrem problemas na área de lançamento, eles devem ser solucionados, sob pena de reduzirem ou paralisarem a produção, a um custo elevado. Isso porque, tipicamente com a metodologia tradicional de execução, o lançamento do concreto rolado se faz de ombreira a ombreira ou em grandes áreas, não se prevendo frentes de trabalho alternativas. A necessidade de não haver interrupção faz com que praticamente todos os materiais, acessos, embutidos, fundações, equipamentos, etc., sejam estudados, planejados e colocados à disposição da obra com a antecedência necessária para não causar atraso no cronograma do empreendimento.

Todos os serviços relativos ao abastecimento, à limpeza de equipamentos e à montagem de formas e de embutidos devem ser levados em consideração, no sentido de não interferirem nos serviços de lançamento, espalhamento e compactação, sendo executados, de preferência, fora das regiões afetadas por tais serviços e em horas de troca de turno ou de parada previamente programada. O acesso às praças de lançamento de veículos e de pessoas não diretamente envolvidos nos serviços relativos ao concreto compactado com rolo deve ser evitado.

As razões dessas precauções residem no fato de a velocidade de construção ser um dos fatores que induzem à maior economia ao se aplicar o método. Uma barragem em CCR pode subir cerca de 60 cm/dia, dependendo apenas da velocidade de produção do material. Com isso, uma obra de 50 m de altura poderia levar cerca de três meses para ser concluída. Este é o caso, por exemplo, da barragem de Saco Nova Olinda, com altura de 56 m e volume de CCR de 138.000 m³, que foi concluída em apenas 110 dias. Diante dessa rapidez construtiva, o fator planejamento é de suma importância em barragens de concreto compactado com rolo.

4.3 Custos

A utilização do concreto rolado em barragens, seja para hidreletricidade, irrigação, abastecimento de água ou controle de cheias, aumentou nos últimos anos. Uma das grandes vantagens da aplicação do concreto compactado com rolo é o ganho significativo na velocidade construtiva, que permite ao proprietário otimizar o prazo construtivo, reduzindo os juros pagos pelo capital investido, resultando numa alternativa de baixo custo global.

Até meados da década de 80, os custos unitários do CCR chegavam a US\$100/m³. Com o passar dos anos e com o crescente conhecimento desta tecnologia de construção, os valores foram sendo reduzidos. Diversas obras passaram a apresentar preços inferiores a US\$40/m³, custo este já incluindo toda a produção de agregados, o transporte, o lançamento, a compactação, a cura, a limpeza de juntas, a argamassa de berço, o cimento e a utilização de aditivos, dentre outros itens utilizados no processo de produção e execução.

Um acontecimento notável em termos de licitação de barragens foi o protagonizado pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) nas licitações da barragem de derivação do rio Jordão e da UHE Salto Caxias, não só pela maneira como foram conduzidas, mas também por terem sido amplamente divulgados os resultados. O nível de preço para o concreto compactado com rolo situou-se entre US\$25/m³ e US\$30/m³. Tal fato serviu para confirmar o desenvolvimento e a otimização da tecnologia de construção de barragens em concreto rolado. Não restam dúvidas de que os preços atingidos nestas concorrências foram muito influenciados pelo mercado brasileiro da construção civil da época e, principalmente por se tratar de licitação de âmbito internacional. No entanto, os valores obtidos serviram para balizar outras obras similares (KUPERMAN, 1986).

As **Figuras 22** e **23** mostram curvas de avaliação do custo unitário (US\$/m³) do concreto compactado com rolo, traçadas pelo USACE (2000) e por Andriolo (1998), respectivamente, considerando várias obras em CCR. Nota-se nas figuras que o custo tende a diminuir conforme aumenta o volume total de CCR.

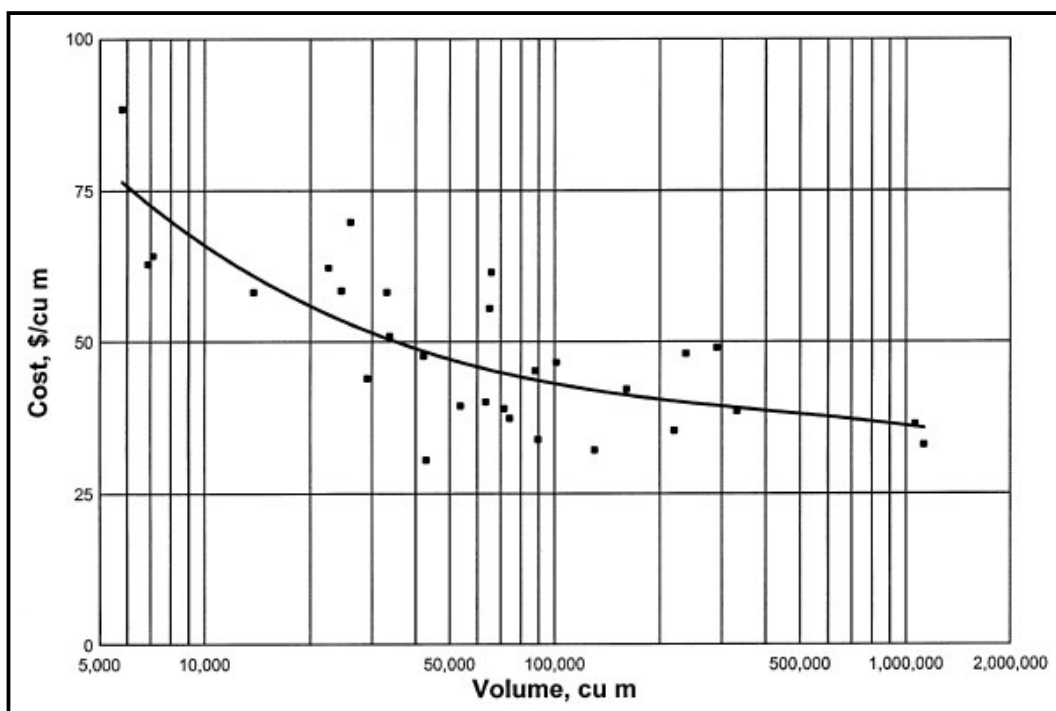
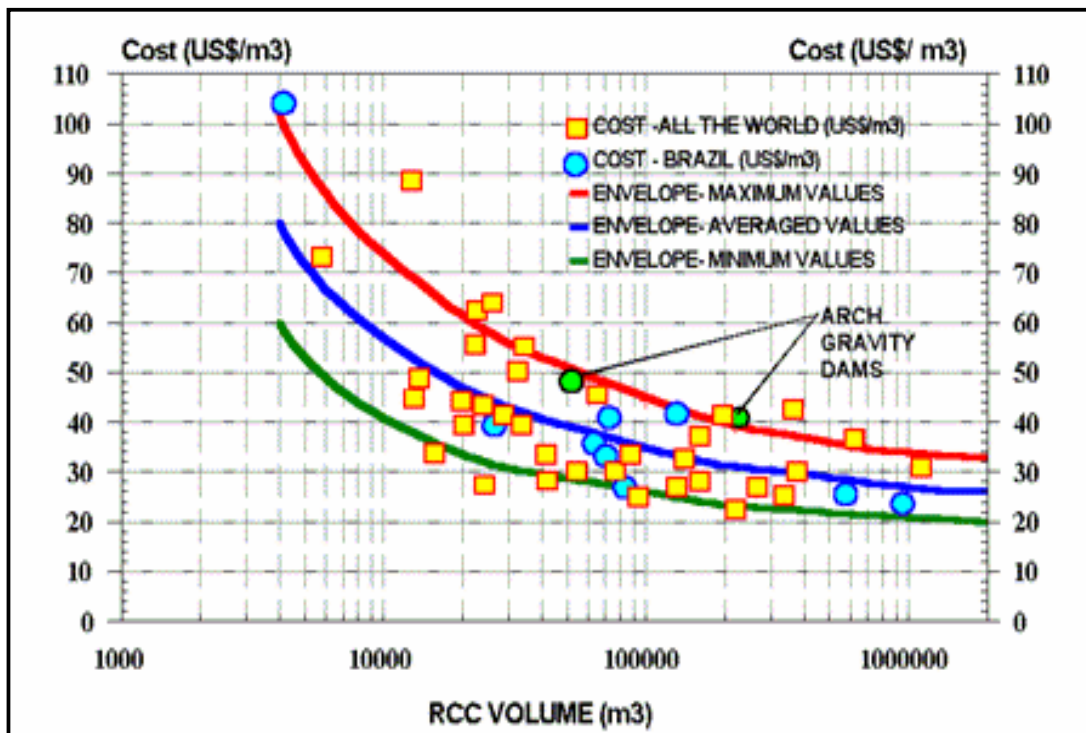


Figura 22 – Custo unitário do CCR.
Fonte: US Army Corps of Engineers (2000).



*Figura 23 – Custo unitário do CCR no Brasil e no mundo.
Fonte: Andriolo (1998).*

Um dos aspectos negativos com relação às barragens de CCR nos últimos anos no Brasil foi o elevado aumento do preço do cimento. Somente em 1999 o custo final aumentou 31,06%, segundo a Fundação Getúlio Vargas. E como em torno de 30% do custo final do CCR/m³ é devido ao custo do cimento, o preço do concreto compactado com rolo sofreu influência direta deste aumento significativo do custo do cimento. A **Figura 23**, abaixo, mostra a variação percentual do custo do cimento comparado com a inflação IGP-M no período de 1999 a 2001.

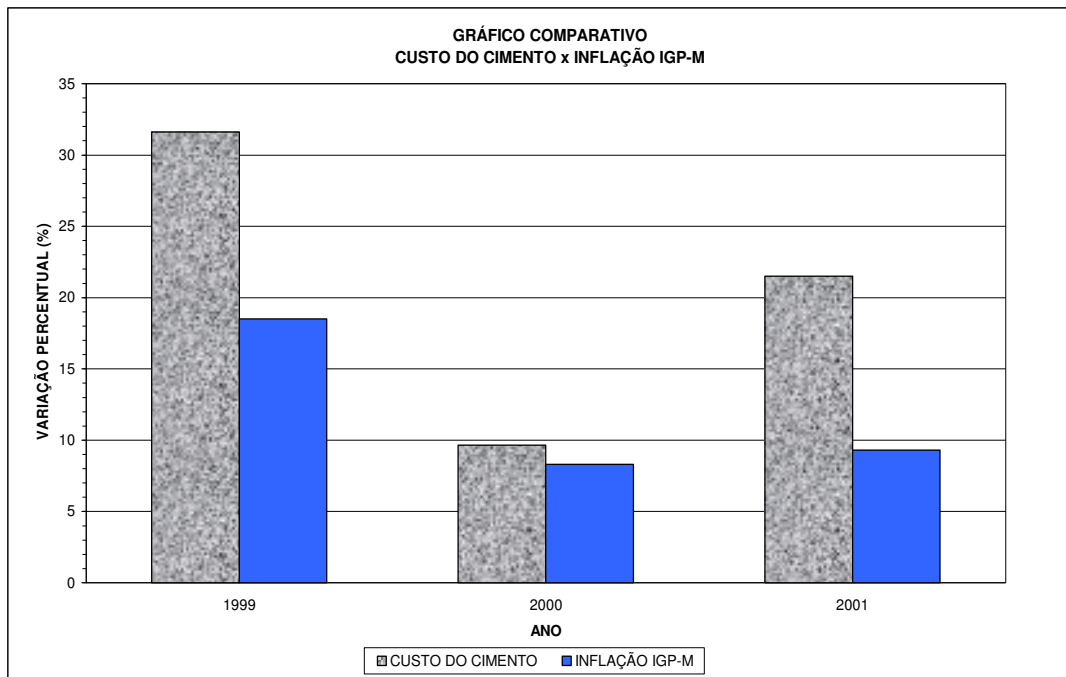


Figura 24 – Variação anual do custo do cimento
Fonte: Fundação Getúlio Vargas

Com a maior utilização do concreto compactado com rolo, principalmente em países em que sua aplicação em barragens é mais intensa, como na China, estão sendo desenvolvidas novas metodologias construtivas, que reduzirão os prazos construtivos e, conseqüentemente, os custos finais do concreto rolado, tornando o seu emprego mais competitivo em relação as tradicionais barragens de terra e de enrocamento.

4.4 Aplicações

O concreto compactado com rolo pode ser utilizado para diversas funções, devido a suas propriedades básicas, como elevada resistência à compressão, resistência à tração, baixa permeabilidade e alta resistência à ação erosiva, quando comparado a materiais não estabilizados.

A execução do CCR não está limitada à construção de barragens de concreto à gravidade. Existem diversos tipos de aplicações que devem ser consideradas, como:

- alteamento, reparos e substituição de materiais em barragens;
- proteção de taludes de barragens de terra ou de enrocamento;
- construção de diques e ensecadeiras;
- melhoria das condições de fundação; e
- execução de pavimentos industriais e de estradas.

Ultimamente, o concreto rolado tem sido utilizado também na construção de barragens em arco, sendo cada dia mais comum a sua aplicação. Como exemplo de barragens de CCR em arco, podemos citar: Saco de Nova Olinda, a primeira barragem de CCR em arco do mundo; Kneelpoort Dam, na África do Sul; e Puding Dam, na China.

Cabe lembrar que a primeira aplicação de concreto compactado com rolo no Brasil ocorreu na execução do piso de almoxarifado, no canteiro de obras da Usina Hidrelétrica de Itaipu, sendo posteriormente utilizado na sua rampa de acesso da estrutura de desvio do rio.

Em países como Estados Unidos, Espanha, Inglaterra e Canadá, existem diversas obras de pavimentação executadas em concreto rolado. No Brasil, a BR-232, que liga o município de Recife ao de Caruaru, em Pernambuco, possui um trecho com 118,4 km executado em concreto compactado com rolo.

Na China, a Usina Hidrelétrica de Três Gargantas (rio Yangtze), atualmente em construção, possui suas ensecadeiras para desvio do rio projetadas em CCR. Tais ensecadeiras possuem até 90 m de altura e 380 m de comprimento de crista, demonstrando assim a dimensão da obra.



*Figura 25 – Pavimentação da BR-232 em CCR.
Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland.*



*Figura 26 – Compactação de pavimento industrial da Honda – EUA.
Fonte: RCC Newsletter – Summer 2001, v.17, n. 1.*

4.5 Razões de emprego

O desenvolvimento do concreto compactado com rolo tem causado grande impacto no planejamento, logística, projeto e construção de barragens à gravidade, pela confirmação, na prática, que sua utilização é uma alternativa rápida, econômica e tecnicamente viável para a construção e também para a recuperação de barragens. Vários projetos, do ponto de vista econômico, anteriormente considerados como pouco viáveis, podem ser reestudados à luz do recente desenvolvimento do concreto rolado (ANDRIOLO, 1989).

Algumas das maiores vantagens da aplicação do concreto compactado com rolo sobre os outros tipos de barragens estão na diminuição no prazo de execução e do custo da obra. Se compararmos a utilização do concreto compactado com rolo com as tradicionais barragens de terra ou enrocamento, os volumes de materiais a serem lançados são menores, bem como o volume de escavação. Cabe ressaltar que vários aspectos devem ser levados em consideração para a seleção da melhor alternativa, como: tipo de topografia local, condições de fundação no local das obras, disponibilidade de materiais de construção e a localização das jazidas e áreas de empréstimo.

As barragens em concreto compactado com rolo devem ser utilizadas como alternativa em locais com existência de jazidas de agregados a uma distância de transporte econômica, em locais com fundação que apresente resistência e impermeabilidade satisfatória. Quanto ao volume envolvido, usualmente é adotada a aplicação do concreto rolado em barragens com volume de concreto superior a 20.000 m³ e com superfície de lançamento com área superior a 500 m².

É conveniente destacar as vantagens da aplicação do concreto rolado:

- a utilização de equipamentos de grande produção, similares aos empregados em obras de terraplenagem;
- sensível redução do consumo de materiais de custo mais elevado, como o cimento;
- redução no uso de formas; e

- manutenção da qualidade final da obra, porém com simplificada e reduzida infraestrutura de apoio.

Com relação à velocidade construtiva, as possibilidades de redução das dimensões das obras de desvio do rio, para um menor risco equivalente, em decorrência do menor tempo de exposição, resultam num arranjo mais otimizado. O ganho significativo na velocidade construtiva permite ao proprietário otimizar o prazo construtivo, reduzindo os juros a serem pagos pelo capital investido, resultando, assim, numa alternativa de baixo custo global.

Outra importante vantagem da solução em concreto rolado deve-se à possibilidade de adotar alterações no arranjo das estruturas. Com a adoção da alternativa em CCR, torna-se possível incorporar o vertedouro livre ao corpo do barramento, como ocorre nas barragens em concreto convencional vibrado.

Deve-se considerar que em obras em concreto rolado existe a possibilidade de galgamento, como ocorreu na barragem de Salto Caxias, localizada no rio Jordão (estado do Paraná). Durante a sua construção, em 1997, a parte central da barragem no leito do rio funcionou como um vertedouro, já que as 15 adufas de desvio, dimensionadas para escoar a vazão de cerca de 6.700 m³/s, foram surpreendidas com vazões muito superiores às vazões de projeto. A estrutura sofreu cinco sucessivos galgamentos, sem ter ocorrido qualquer tipo de dano (LEVIS *et al*; 1998).

Capítulo 5

TENDÊNCIAS FUTURAS

5.1 Introdução

Com o recente surgimento de novas técnicas e métodos construtivos, o CCR alcançou agilidade e economia de custo significativa na construção de barragens de concreto. Atualmente, barragens em CCR que se aproximam de 200 m de altura, como Miel 1, na Colômbia, com 190 m, e os recentes projetos de Ta Sang, com 217 m, e Longtan, na China, com 216 m, os assuntos relacionados à coesão entre as camadas e impermeabilidade são considerados de suma importância. Na barragem de Ta Sang, na qual o volume de CCR é de aproximadamente 10 milhões de m³, a área total da superfície das juntas entre as camadas excederão 3.300 hectares e o comprimento total de juntas induzidas, expostas na face de montante, terá mais de 350 km (FORBES, 1999).

Neste capítulo descrevem-se e discutem-se os mais recentes métodos e técnicas em uso para reduzir o risco de falhas na construção, aumentar as taxas de lançamento de CCR e reduzir o tempo de execução. Entre as novas técnicas se incluem o método rampado e o CCR enriquecido com argamassa (Grout Enriched Roller Compacted Concrete – GERCC). Os métodos descritos oferecem boas perspectivas para a construção de barragens em concreto CCR.

5.2 Paramentos hidráulicos

Os objetivos principais dos paramentos são: prover uma superfície durável e aumentar a impermeabilidade da estrutura. As condições de projeto relativas às inclinações dos

paramentos em barragens de CCR são iguais às efetuadas para barragens de CCV e estão relacionadas, principalmente, às análises de estabilidade e aos níveis de tensões atuantes.

A inclinação do paramento de jusante de barragens de CCR tem variado entre 0,6 e 1,0 na horizontal para 1,0 na vertical. Estas inclinações têm sido usadas de maneira a obedecer aos critérios vigentes sobre tensões atuantes nas estruturas, de maneira similar às estruturas de concreto convencional. Normalmente, essa inclinação intercepta a face de jusante, vertical, num ponto próximo à crista, de maneira a resultar em largura de crista da ordem de 5 a 10 m. Essa largura é adequada para possibilitar a utilização de equipamentos, de maiores ou menores dimensões, de lançamento, espalhamento e compactação.

Pelo fato de o CCR ser um material seco, em princípio, pode dispensar o uso de formas durante seu adensamento, ao contrário do concreto convencional, que, obrigatoriamente, necessita de uma forma que o contenha. Assim, obras como: Willow Creek, Middle Fork e Copperfield não utilizaram formas na moldagem do concreto no paramento de jusante (ANDRIOLO, 1989).



Figura 27 – Copperfield Dam na Austrália
Fonte: International Water Power & Dam Construction

Numerosos métodos de construir o paramento de montante e de jusante foram adotados em faces de barragens desde que a primeira barragem de concreto compactado com rolo foi concluída. O mais utilizado tem sido o de uma membrana de CCV construída simultaneamente com as camadas de CCR. Existem ainda outros métodos de execução do paramento de montante de barragens em CCR, como: CCV contra fôrma e adição de membrana sintética, CCR contra placas de concreto pré-moldado, utilização de máquinas de deslizamento horizontal da face em CCV e, mais recentemente, a aplicação de CCR enriquecido com argamassa em contato direto com o reservatório.

De maneira conservadora, o paramento de montante de barragens de concreto tem utilizado o concreto convencional como elemento impermeável, sendo adotadas apenas variações quanto à dosagem do teor de aglomerante e quanto à espessura do concreto convencional.

A prática brasileira de construção de barragens em concreto rolado mostra que a maioria de nossas barragens tem um concreto convencional de durabilidade e impermeabilidade diferenciada na região do contato com a água. São exemplos: Saco de Nova Olinda, Jordão, Caraíbas e Dona Francisca.



**Figura 28 – Detalhe do paramento de jusante em CCV da UHE Dona Francisca.
Fonte: COPEL.**

A **Figura 29** mostra a seção típica de barragem em que o paramento de montante foi projetado para receber uma membrana impermeável com espessura de 0,50 m, em concreto convencional vibrado (CCV), o núcleo do barramento executado em concreto compactado com rolo, o paramento de jusante com a inclinação de 1,0 na vertical para 0,75 na horizontal e espessura da crista da barragem de 7,0 m.

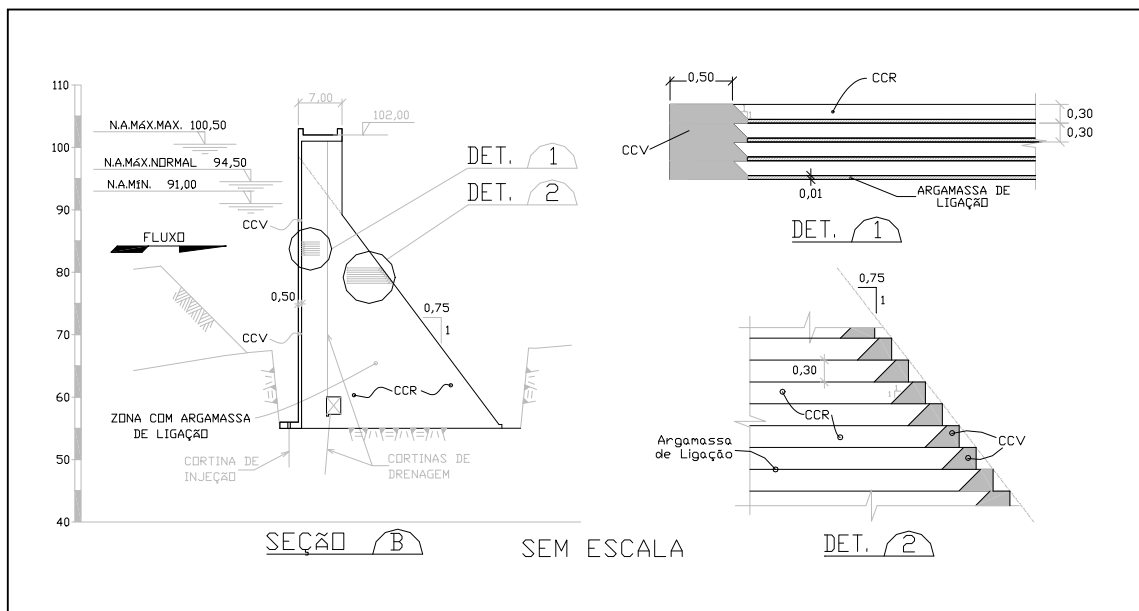


Figura 29 – Paramentos hidráulicos da UHE Dona Francisca.
Fonte: Projeto Básico UHE Dona Francisca.

Em barragens nas quais o núcleo é executado em CCR de baixo consumo de aglomerante e o paramento de montante executado em concreto convencional (como é o caso da figura anterior), pode-se usar uma camada de concreto convencional, adensado com vibradores de imersão, de espessura variável, possuindo coeficiente de permeabilidade conhecido. Esta espessura é dimensionada para que não ocorra contato da água de percolação com o concreto compactado com rolo, situado no núcleo, para o período de vida útil da obra.

Para o cálculo teórico da espessura, pode ser utilizada a expressão desenvolvida por Bazant:

$$e = \sqrt{2 \cdot p \cdot k \cdot \frac{t}{a}}$$

Onde:

e: espessura do paramento (m);

p: altura da coluna de água (m);

k: coeficiente de permeabilidade (m/s);

t: tempo de vida útil considerado (s);

a: absorção (%).

A **Figura 30** exemplifica a metodologia de cálculo dos valores de espessura para vida útil de 35 anos e de 50 anos, com coeficientes de permeabilidade de 10^{-13} m/s, absorção de 4%, para diferentes alturas de coluna de água, utilizando a expressão de Bazant.

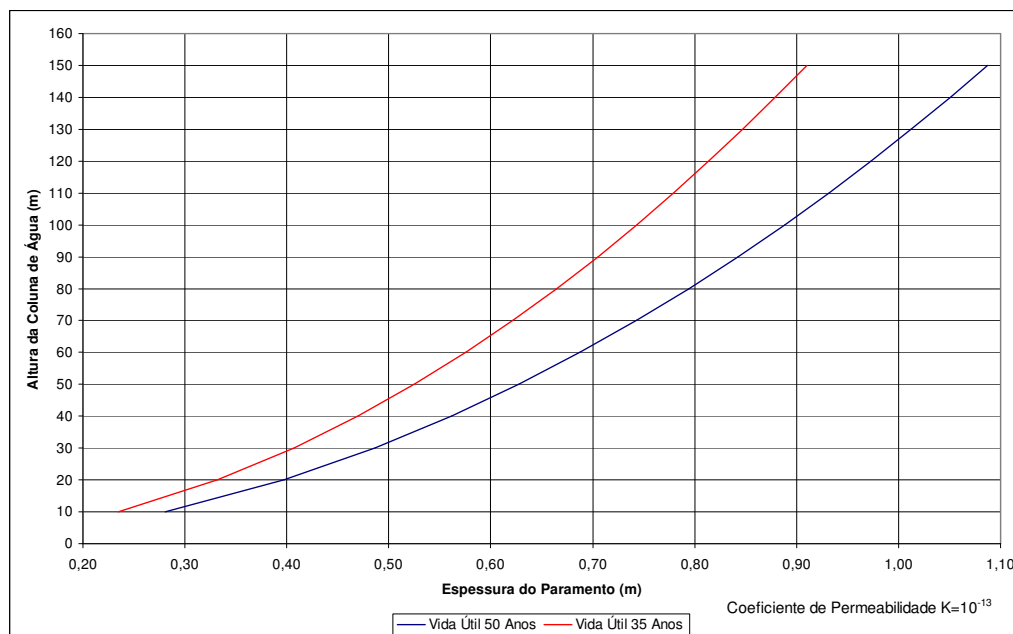


Figura 30 – Espessura do paramento hidráulico

Um das maiores preocupações com o uso concreto convencional simultaneamente com CCR está na dificuldade de realizar a compactação do CCR ao longo de sua interface com o revestimento em CCV. O resultado pode ser uma zona porosa, fraca de material de CCR,

e o possível surgimento de rachaduras longitudinais ao longo da interface entre os dois concretos.

5.3 O CCR enriquecido com argamassa ou GERCC

Recentemente, uma tendência tem se destacado no uso do concreto compactado com rolo como elemento de estanqueidade, diretamente aplicado na face de montante e de jusante. A grande vantagem de sua aplicação é que se dispensa o uso de concreto convencional, tradicionalmente usado no paramento, reduzindo, assim, o tempo de execução e o volume de mão-de-obra, a disponibilidade de equipamentos.

O método utiliza dosagens diferenciadas, com adição de materiais com maior quantidade de finos. Ajustando as proporções de mistura de CCR com a introdução de uma argamassa de cimento e água, o CCR pode ser levado a uma consistência de maior trabalhabilidade, de tal forma que possa ser adensado com vibradores de imersão usados no concreto convencional.

A primeira tentativa de utilização do método ocorreu em 1987, numa ensecadeira da barragem Yantan, na China. Na ocasião, uma argamassa de água de cimento foi lançada em cima da superfície de CCR. Quando ocorria a saturação do CCR, a mistura poderia ser compactada efetivamente com vibradores de imersão ao longo da face vertical de montante, formando um revestimento homogêneo e impermeável (FORBES, 1999). Na ocasião, os engenheiros chineses denominaram tal material de “concreto modificado”.

A técnica foi usada pela segunda vez novamente na China, em 1989, na barragem Rongdi. Na barragem de CCR, com 53 m de altura, utilizou-se o “concreto modificado” ao longo de toda a face do paramento de montante. Mais tarde, em 1992, na barragem de CCR, em arco de Puding com 75 m de altura, localizada também na China, utilizou-se a metodologia nas faces dos paramentos de montante e de jusante. Segundo Forbes (1999), não ocorreu nenhuma percolação significativa no paramento da barragem de Puding, comprovando a eficiência e a qualidade desse método construtivo.

Depois do sucesso verificado na barragem de Puding, as barragens em concreto compactado com rolo da China, em sua maioria, foram construídas utilizando o concreto modificado como material de revestimento. Na barragem de Dachaoshan, na China, os degraus de jusante, com 0,90 m de altura, da calha de vertedouro livre, foram construídos usando tal metodologia.

O material, anteriormente chamado pelos chineses de “concreto modificado”, recebeu a denominação de *Grout Enriched Roller Compacted Concrete* (GERCC), ou concreto compactado com rolo enriquecido com argamassa.

Recentemente, inúmeros projetos de barragens (Cadiangullong na Austrália, Horseshoe Bend na Nova Zelândia, Tannur na Jordânia) vêm utilizando como paramento de montante impermeável o concreto enriquecido (GERCC) em substituição ao concreto convencional tradicionalmente usado. Em alguns projetos, o GERCC foi também usado entre o contato do CCR com a rocha, na envoltória das galerias de drenagem, podendo receber armadura em aço para reforço da estrutura.

A utilização dessa metodologia cresceu de 5% no início da década de 90 para 10% no final de 1995. O método tem sido utilizado principalmente em barragens executadas na Espanha e na China.

No Brasil, o método foi testado na pista experimental de campo da UHE Lajeado. Naquela ocasião, utilizou-se o concreto enriquecido com argamassa, com um consumo de cimento de 190 Kg/m^3 (BATISTA, *et al.*, 2002). Os resultados dos ensaios de permeabilidade ainda não foram divulgados.

5.3.1 Execução do GERCC

A dosagem da argamassa requerida pode ser determinada em laboratório ou em pista experimental no campo. A utilização de aproximadamente 20 l/m^2 de argamassa para

camadas com espessura de 0,30 m de CCR, em que o concreto rolado de base continha algo em torno de 160 Kg/m^3 de materiais cimentícios, foi considerada satisfatória. Aditivos redutores de água, retardadores de pega, incorporadores de ar e plastificantes podem ser utilizados na dosagem quando necessários (FORBES, 1999).

A argamassa deve ser aplicada somente no trecho determinado. Usualmente esse trecho tem em torno de 0,50 m. A aplicação pode ocorrer abaixo da nova camada de CCR a ser lançada, no topo da superfície lançada, em ambos os casos, ou no momento do espalhamento do CCR a ser executado. Quando aplicação ocorre abaixo da nova camada de CCR, a tendência natural durante o processo de vibração interna do GERCC é que a pasta seja elevada à superfície. Para que isso ocorra, a sua viscosidade deve ser tal que permita a sua fluência pelo CCR sem que permaneça depositada na parte inferior da camada. Durante a compactação o operador poderá verificar se o processo está ocorrendo de maneira efetiva.

Durante a remoção do vibrador de imersão do interior do concreto, qualquer tipo de cavidade originada deve ser preenchida ou, se necessário, deve ser aumentada a quantidade de argamassa na aplicação.

A especificação da dimensão do vibrador de imersão depende de fatores como o diâmetro máximo do agregado, a trabalhabilidade do concreto rolado e a quantidade de argamassa.



**Figura 31 – Processos de adensamento do GERCC em Tannur e Jiangya Dam.
Fonte:International Water Power & Dam Construction.**

A mistura da argamassa a ser utilizada no GERCC pode ser feita manualmente ou pela central de concreto. O transporte pode ser feito por correias transportadoras, caminhões betoneira ou manualmente, com auxílio de carrinhos de mão ou balde, conforme mostrado na **Figura 31**.

A compactação do CCR por meio do rolo vibratório deve acontecer até a zona tratada com GERCC ou até o limite que as formas permitirem, de modo que o contato entre os dois tipos de concreto seja efetivamente compactado. Caso o GERCC receba uma quantidade de argamassa superior à esperada, durante o processo de compactação, a pasta será elevada para a superfície pelo rolo vibratório. Caso a espessura da pasta ultrapasse 20 mm na superfície, devem ser reduzidas as taxas de dosagem, e o diâmetro do vibrador interno deve ser revisto (FORBES, 1999).

O tratamento das juntas, quando necessário, será feito com auxílio de jatos d'água em alta pressão. Não sendo ultrapassado o tempo de lançamento especificado entre as camadas, nenhum tratamento especial será necessário.

Devem ser coletadas amostras de GERCC após a sua compactação, para que sejam realizados os ensaios predeterminados pelo programa de controle de qualidade, podendo, assim, comprovar as características do concreto.

5.3.2 Vantagens do GERCC

Os principais benefícios observados da aplicação do GERCC são:

- maior qualidade no acabamento do concreto sem fôrma;
- durabilidade;
- impermeabilidade;
- homogeneidade com o CCR adjacente;

- facilidade de construção;
- apenas um sistema de mistura e transporte é necessário;
- a argamassa pode ser misturada manualmente, por caminhões betoneira ou pela central de concreto;
- sistemas de impermeabilidade e reforços podem ser incorporados no concreto;
- pode ser usado entre o CCR e o contato com a rocha para alcançar maior coesão e preencher os vazios e irregularidades; e
- redução nos custos.

5.3.3 Desvantagens do GERCC

As principais exigências, limitações e desvantagens da utilização do GERCC são:

- apresentar boa quantidade de pasta de cimento e água;
- possuir trabalhabilidade necessária para ser adensado por vibradores de imersão;
- contar com controle de qualidade e inspeção regularmente;
- necessitar tratamento das juntas, como em qualquer estrutura em concreto convencional;
- oferecer menor facilidade de acabamento de superfícies niveladas, como em degraus de vertedouro.

5.3.4 Resultados obtidos com o GERCC

Foram observados na execução do GERCC durante a construção de diversas barragens na China, Nova Zelândia e na Jordânia: significativa redução nos custos, aumento na velocidade construtiva e permeabilidade suficiente para utilizar o próprio CCR como elemento de vedação em contato com o reservatório.

5.4 O método rampado

Uma diferença significativa entre uma barragem de concreto convencional e uma de concreto compactado com rolo encontra-se no número de juntas de construção horizontais. Enquanto em barragens de concreto convencional é comum utilizar camadas com espessura de 1,5 m, as barragens em concreto compactado com rolo geralmente são executadas camadas com 0,3 m, para alcançar as densidades compactadas exigidas por meio do rolo de compactação. Assim, ocorrem cinco vezes mais juntas entre as camadas na barragem de CCR.

É mais provável que o ponto fraco de uma barragem de concreto à gravidade aconteça ao longo de seu contato com a fundação ou ao longo de uma junta entre camadas do que pelo próprio maciço de CCR. As juntas possuem mais baixa resistência à tração e ao cisalhamento e impermeabilidade que o concreto compactado com rolo. Isso ocorre em razão, principalmente, da idade da superfície do concreto da camada, da tendência para segregação do CCR na superfície da junta e da possível diminuição da densidade, com o aumento da profundidade da camada. Experiências anteriores mostraram que as percolações em barragens de CCR geralmente acontecem ao longo das juntas entre as camadas, e não pelo corpo da camada de CCR. Essa é uma evidência clara de construção não monolítica.

Barragens à gravidade em CCR com mais de 100 m de altura construídas em meados da década de 90 (Pangue, Porce 2 e Jiangya) requerem significativa capacidade de resistência à

tração vertical e resistência de cisalhamento horizontal do CCR nas juntas entre camadas. Tipicamente, resistências de cisalhamento de 1 a 1,5 MPa e forças de coesão de 0,5 a 1,0 MPa são requeridas em casos extremos (FORBES, 1999).

Com os elevados volumes de lançamento, o trabalho noturno e a urgência na preparação das superfícies que receberão a nova camada de CCR, é inevitável que, em algumas ocasiões, ocorram reparos nas juntas horizontais entre camadas.

O risco de ocorrer uma camada defeituosa precisa ser reduzido. Para alcançar um CCR homogêneo, monolítico nas juntas, a camada de lançamento deve ser colocada no prazo estipulado sobre a camada anteriormente executada. Sem a utilização de aditivos retardadores na dosagem do concreto, este tempo normalmente é 1,5 a 2,5 horas. Com o uso de retardadores, este tempo pode ser estendido para 5 a 8 horas.

Apesar do cuidado necessário para minimizar o trânsito de equipamentos em cima de camada concluída, o sistemático processo de limpeza com ar comprimido, a aplicação de água para a cura ou o uso do concreto rolado com alto teor de *fly ash* ou pozolana, torna-se praticamente impossível alcançar homogeneidade e monoliticidade completa somente com o lançamento horizontal da argamassa de ligação. Inevitavelmente, zonas de mais baixa resistência existirão nas juntas entre as camadas do concreto compactado com rolo.

O método rampado foi concebido na barragem de Jiangya (131 m de altura) em 1997, na China. Devido à necessidade de volumes de lançamento consideravelmente elevados, o método pôde ser avaliado, resultando na substituição do lançamento das camadas horizontais no lançamento das camadas inclinadas de concreto (FORBES, 1999).



Figura 32 – A barragem de Jiangya durante a construção
Fonte: International Water Power & Dam Construction

A aplicação do método rampado no Brasil ocorreu durante a construção da UHE Lajeado, concluída no final de 2001. Este método foi colocado em prática inicialmente em uma estrutura provisória com volume de 20.000 m³ e posteriormente na barragem leito do rio, com cerca de 200.000 m³ de CCR (BATISTA *et al.*, 2002).

5.4.1 Execução do método rampado

Anteriormente à aplicação do método rampado, o procedimento em Jiangya consistia em dividir a barragem em blocos com 60 m de largura, com formas verticais de 3 m de altura, colocando 10 camadas horizontais de CCR cada uma com 0,3 m de espessura, finalizando uma camada de 3,0 m entre as formas da face de montante. A área contida de lançamento dentro da forma era tal que podiam ser colocadas as camadas de CCR no período de 5 a 6 horas. A junta fria era tratada com corte verde no topo dos 3 m da camada e, depois, uma argamassa de ligação aplicada antes do lançamento da próxima camada, como acontece geralmente no método tradicional de barragens em CCR. O custo da forma transversal e do aditivo retardador, as dificuldades de manter um acesso de rampa para os caminhões, constituíam aspectos negativos do sistema utilizado em Jiangya (FORBES, 1999).

Removendo a forma transversal e lançando as camadas de CCR inclinadas com espessura de 0,3 m, de um limite para o outro entre as formas de montante e de jusante, a mesma camada com 3 m poderia ser construída como um processo contínuo pela barragem inteira, sem a necessidade de uma forma transversal. A inclinação da rampa da camada podia sempre que necessário, quando uma nova camada de CCR nova começava a ser lançada. O volume de CCR colocado em qualquer camada inclinada com espessura de 0,3 m pode ser alterado mudando a inclinação da camada. A utilização de formas com uma altura “H”, camadas de CCR com espessura “e”, largura “L” entre as faces de montante e a jusante, produção do misturador de CCR “P”, tempo definido de “t” horas, a inclinação “i” das camadas para uma altura vertical de 1 m, pode ser avaliada pela expressão abaixo:

$$i \leq \frac{t \cdot P}{L \cdot H \cdot e}$$

Onde:

i: distância horizontal para a altura vertical de 1 m (m);

t: tempo de lançamento (h);

P: produção de CCR (m³/h);

L: distância entre os paramentos de montante e de jusante (m);

H: altura das formas dos paramentos (m);

e: espessura da camada inclinada de CCR (m).

Usando altura de 3 m de formas, camadas de CCR com espessura de 0,30 m, largura de 100 m entre as faces de montante e jusante, produção de misturador de CCR de 500 m³/h, tempo de 2 horas, a distância horizontal “i” das camadas para uma altura vertical de 1 m deve ser:

$$i \leq \frac{2 \cdot 500}{100 \cdot 3 \cdot 0,3} \qquad i \leq 10 \text{ m}$$

Conseqüentemente, em elevações mais baixas da barragem, onde uma largura L =100 m pode ocorrer, uma rampa de 1 para 10 é requerida (10%). Nas elevações superiores perto da crista, quando a largura é reduzida em torno de 25 m, uma rampa mais suave de 1 para

40 poderia ser usada, mas talvez o tempo de lançamento entre as camadas de concreto rolado, de 0,5 horas, seja muito curto. Tentativas iniciais na barragem de Jiangya confirmaram que uma rampa íngreme de 1 para 8 (12,5%) era possível com o rolo vibratório operando de cima para baixo na rampa (FORBES, 2001).



Figura 33 – Detalhe da inclinação das camadas na UHE Lajeado.
Fonte: Furnas Centrais Elétricas S.A.

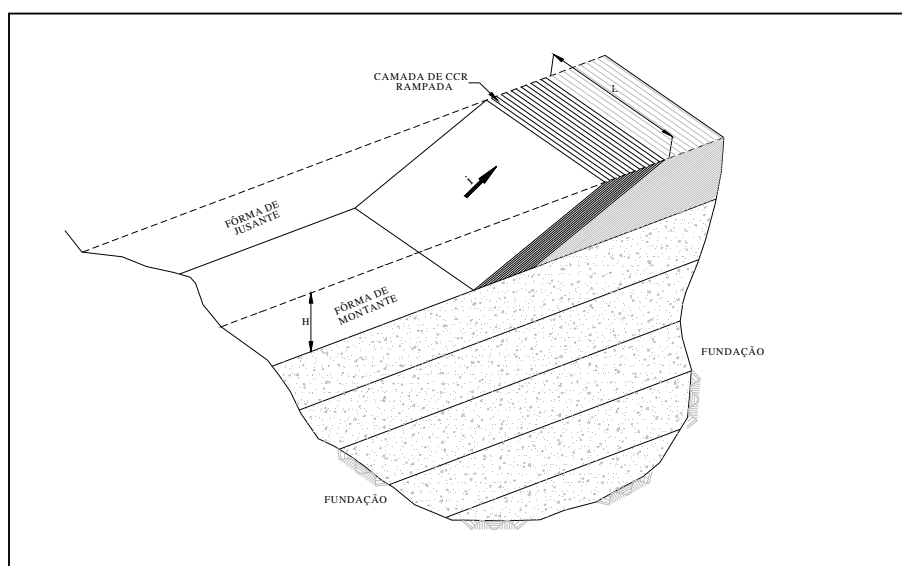


Figura 34 – Procedimentos do método rampado.
Fonte: Forbes (1999).

Usando este método a limpeza final e a preparação de superfície da camada inferior, a aplicação de argamassa de ligação fica restringida a uma faixa estreita ao longo da base ou calço da camada inclinada. Para rampas de 1 para 10 (10%), a largura da faixa é de aproximadamente 3 m e para rampas de 1 para 40 (2,5%), seria de aproximadamente 13 m. A superfície superior da camada de 3 m concluída pode receber o corte verde quando o CCR ainda é jovem e as formas das faces de montante e de jusante podem ser erguidas com antecipação. Quando são colocadas camadas inclinadas de 0,3 m de espessura dentro do tempo programado, nenhum trabalho de limpeza, de preparação de superfície ou de aplicação de argamassa de ligação é requerido antes do lançamento da próxima camada inclinada. Portanto, o método reduz a preparação de superfície requerida em até 90% (se compararmos com métodos tradicionais de CCR com camadas de 0,3 m). Também reduz o número de juntas entre as camadas e, conseqüentemente, a possibilidade de ocorrência de pontos fracos na barragem. A adoção do método rampado para construir camadas de 3 m de espessura, então, resulta na redução pela metade do número de camadas que seriam esperadas em uma barragem de concreto convencional construída com camadas de 1,5 m.

A solução adotada na barragem de Jiangya para superar a existência de uma série de irregularidades, tanto na área inferior de cada camada rampada como na elevação da superfície das camadas de 3 m, e onde pudessem ser esmagados agregados de CCR facilmente debaixo do rolo vibratório, constitui no lançamento de uma camada horizontal com largura de 4 a 5 m e espessura de 0,15 a 0,3 m antecipadamente ao longo do topo da camada concluída como uma base ou um calço. O concreto foi lançado e compactado no sentido da face de montante para a face de jusante. A camada inclinada iniciou-se então sobre o centro da base ou calço, como mostrado na **Figura 35** (FORBES, 1999).

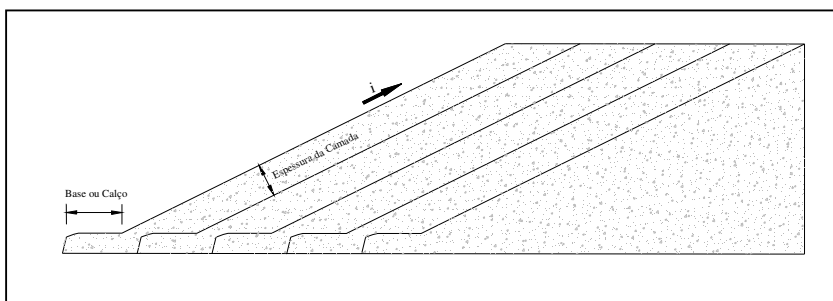


Figura 35 – Processo de execução do método rampado

As irregularidades que ocorrem no topo das camadas inclinadas precisam ser reduzidas como parte do corte verde e do processo de preparação da camada. Isto é facilmente alcançado usando jato de ar e água sob alta pressão e retirando qualquer tipo de material solto na região de ocorrência dos cantos vivos.

Além de assegurar camadas de CCR com qualidade melhorada, o método rampado remove do caminho crítico os trabalhos de tratamento e cura da superfície, e o levantamento das formas quase que independente do lançamento de concreto compactado com rolo. Além disso, a quantidade de tempo disponível para limpeza e preparação da superfície da camada é aumentada significativamente.



**Figura 36 – Controle de inclinação das camadas de CCR na UHE Lajeado.
Fonte: Furnas Centrais Elétricas**

O perfil da rampa das camadas inclinadas pode ser controlado durante o lançamento com a marcação de linhas nas formas (conforme mostrado na *Fig. 36*) ou através de métodos topográficos.

Para a execução dos paramentos inclinados a melhor solução parece ser adotar degraus verticais a jusante, quando forem usadas formas. Então, a altura do degrau seria igual à altura de camada de CCR. Na barragem de Tannur, na Jordânia, foram utilizadas camadas com altura de 1,2 m formadas por quatro camadas inclinadas de 0,3 m. Esta medida

emparelhou a altura de acabamento dos degraus do paramento de jusante. Na barragem de Jiangya, blocos de concreto pré-moldados foram utilizados como forma de jusante, de modo a formar degraus com altura de 1 m. Os blocos foram reutilizados à medida que a barragem progrediu. Quando a mudança foi feita, na inclinação das camadas com 3 m de altura, o mesmo sistema de blocos foi utilizado. Os blocos estavam separados do CCR, colocando-se placas de aço contra os blocos. As placas foram estendidas além do bloco principal, uns 1,5 a 2 m, para prover apoio interino pela zona de CCR inclinado um pouco antes da conclusão da superfície horizontal do degrau. Este sistema de blocos pré-moldados dos degraus parece ser o método ideal, pelo qual mais de um degrau é exigido para emparelhar a altura de camada selecionada. A recolocação dos blocos e das placas de aço é um processo simples e repetitivo, podendo ser finalizado facilmente com alguns operários e um guindaste móvel de pequeno porte (FORBES, 1999).



*Figura 37 – Detalhe do paramento de jusante executado em degraus.
Fonte: International Water Power & Dam Construction*

O método rampado pode trabalhar bem quando empregado em conjunto com o GECCR (CCR enriquecido com argamassa) nas faces de montante e de jusante da barragem e na junção do CCR com as rochas de fundação. Na barragem de Tannur, os dois métodos foram utilizados simultaneamente.

Geralmente, o lançamento de uma camada inclinada se desenvolve começando na face de jusante e movendo-se para a face de montante, trabalhando em toda altura da camada e compactando a rampa. Em elevações mais baixas da barragem, onde a camada inclinada é bastante larga, a área de colocação pode ser dividida em subáreas e pode ser lançada, esparramada e compactada, começando no terço de jusante, progredindo pelo terço central e, finalmente, no trecho de montante.

A declividade transversal de 2% a 3% de montante utilizada no lançamento do método tradicional de camadas horizontais, para o propósito de drenagem, pode ser mantida na execução do método rampado. A declividade transversal resultante na conclusão das sucessivas camadas inclinadas funcionará então como no método de camadas horizontais. Tal declividade é muito útil na superfície da camada, pois facilita a drenagem durante os processos de corte verde, limpeza e preparação dos trabalhos, além de servir de drenagem para água das chuvas (FORBES, 1999).

5.4.2 Vantagens do método rampado

As principais vantagens observadas na aplicação do método rampado são:

- ligação entre as camadas de CCR com homogeneidade e monoliticidade;
- redução do número de camadas de ligação horizontais, se comparado com o método tradicional de lançamento de CCR em camadas horizontais com o concreto convencional;
- estrutura mais segura, com maior segurança global;
- redução no trabalho de limpeza, tratamento e aplicação da argamassa de ligação;
- limitação do número de juntas frias;

- deslocamento da limpeza, do corte verde e do tratamento da junta de ligação para fora do caminho crítico e permite mais tempo na preparação da junta da camada finalizada para lançamento da próxima camada de CCR;
- dificuldade de a água e as impurezas resultantes da limpeza das juntas invadirem a área de lançamento em andamento;
- possibilidade de utilização de formas a montante e a jusante para retardar o caminho crítico e, potencialmente, alguns dias à frente de ser requerido, sendo que as formas podem ter a liberdade de permanecer por um período mais longo para efetuar a cura ou proteção térmica do concreto;
- adoção de procedimento de retirada rápida das formas de modo a reduzir a quantidade necessária das mesmas para a aplicação;
- redução da área de exposição do CCR recém-executado, que poderia ser danificado pela ação da chuva ou condições severas de temperatura e, como uma consequência, o volume de CCR que pode requerer remoção e substituição;
- redução do potencial para o CCR em estado fresco ganhar calor em condições ambientes quentes;
- possibilidade de prever aberturas na crista da barragem que são capazes de escoar vazões maiores que a capacidade normal, resultando num projeto mais seguro; e
- aumento taxas de lançamento global de CCR.

5.3.3 Desvantagens do método rampado

As principais exigências, limitações e desvantagens observadas na utilização do método rampado são:

- opções de forma do paramento de jusante limitadas à utilização de degraus altos (igual à altura de camada) ou uso de blocos de concreto pré-moldado;

- necessidade de cuidados especiais na base da camada inclinada para assegurar menor quantidade de irregularidades onde o agregado pode ser esmagado facilmente debaixo do rolo compactador, podendo resultar em um caminho preferencial de percolação;
- remoção, durante o processo de corte verde, das irregularidades que podem acontecer no topo das camadas inclinadas concluídas;
- o acabamento da superfície externa do degrau de jusante com concreto (GERCC ou CCV) é um pouco mais difícil.

5.3.4 Resultados do método rampado

Um aspecto importante, pesquisado na UHE Lajeado, relacionou-se à temperatura do concreto, uma vez que, com o método rampado, as camadas são inclinadas e sucessivas, com cobertura muito precoce, o que poderia originar um maior pico de temperatura do concreto.

Nas *Figuras 37* e *38* são mostradas as evoluções de temperatura do concreto compactado com rolo, respectivamente, para o método tradicional e para o método rampado. O maior pico de temperatura, em ambos os métodos, foi observado para o concreto convencional de face. Na ocasião, foi relatado que a diferença de elevação da temperatura do concreto compactado com rolo do método tradicional para o método rampado foi de apenas 2,5°C (BATISTA *et al.*, 2002).

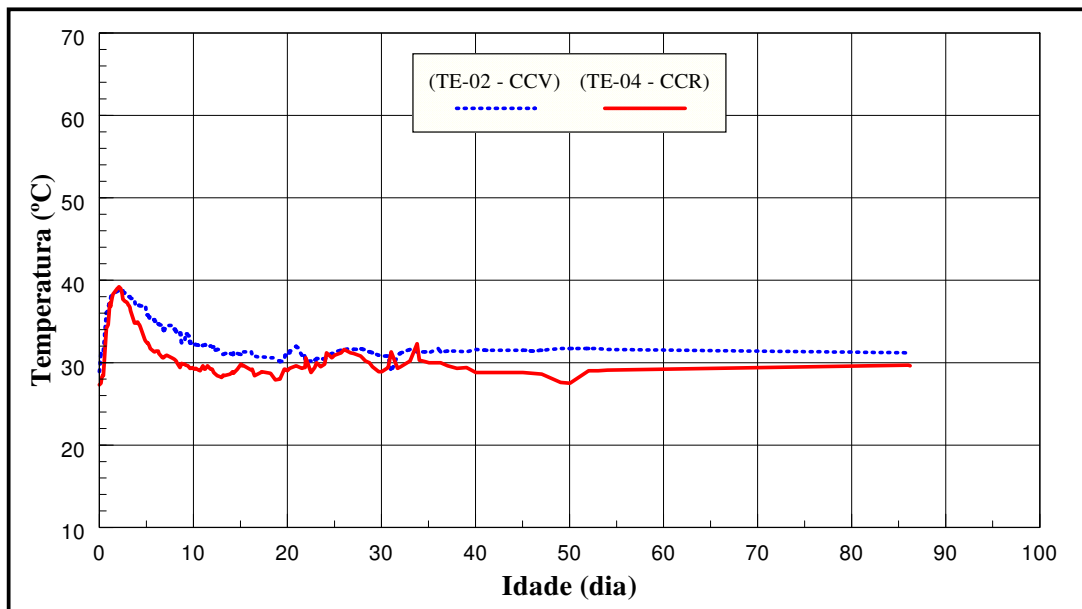


Figura 38 – Elevação da temperatura no concreto - método tradicional
Fonte: Furnas Centrais Elétricas S.A.

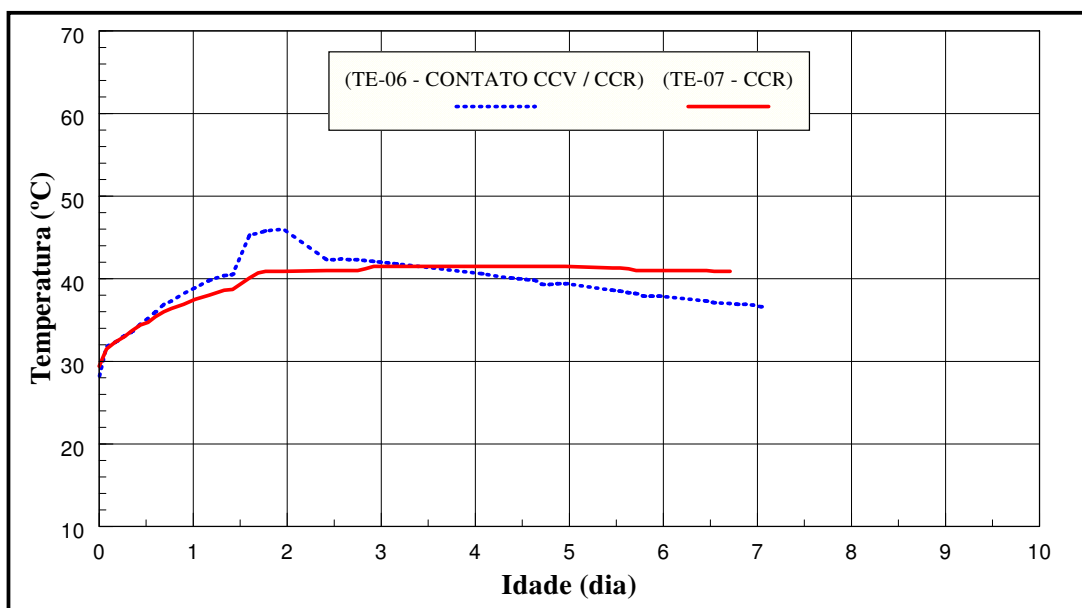


Figura 39 - Elevação da temperatura no concreto - método rampado
Fonte: Furnas Centrais Elétricas S.A.

Os resultados referentes à produtividade e ao custo obtidos na aplicação do método rampado, comparativamente com o método tradicional, ocorrido na UHE Lajeado (2001), podem ser sintetizados nas **Figuras 40 e 41**.

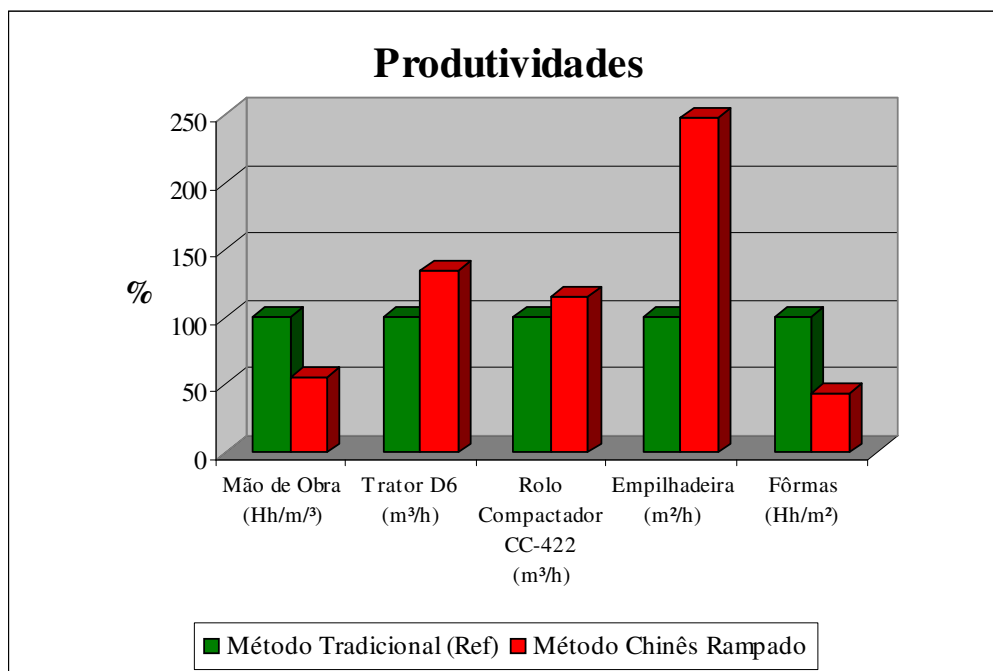


Figura 40 - Comparação de produtividades: método tradicional x método rampado.
Fonte: Furnas Centrais Elétricas S.A.

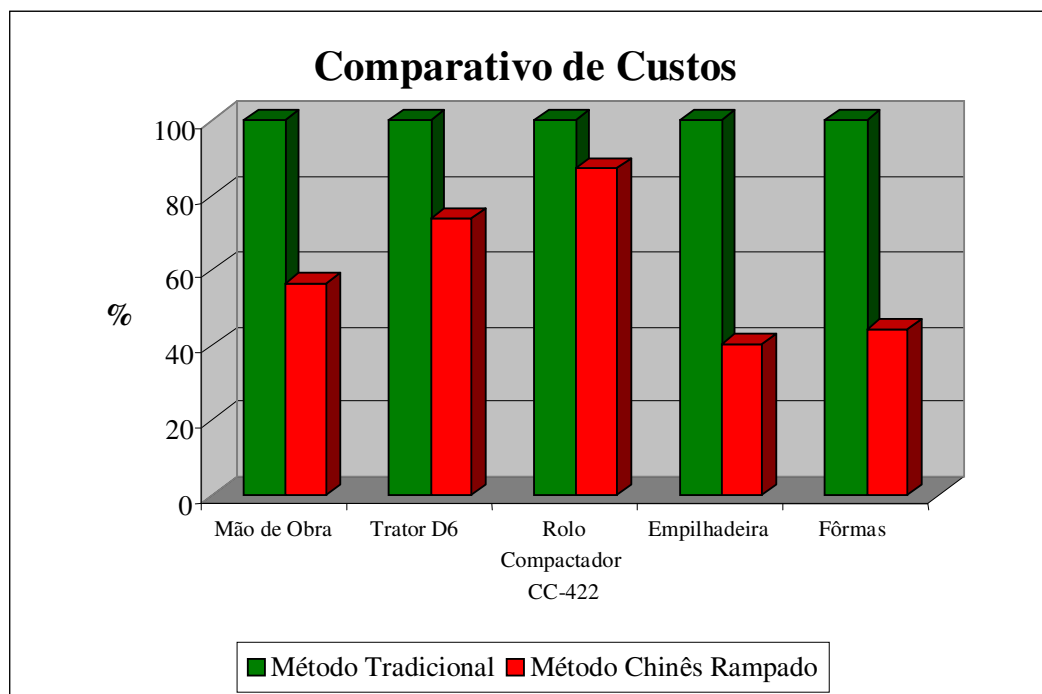


Figura 41 - Comparação de custos: método tradicional x método rampado.
Fonte: Furnas Centrais Elétricas S.A.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O concreto compactado com rolo pode ser utilizado em substituição ao concreto convencional em barragens de concreto à gravidade ou em arco. Pode ser utilizado ainda em alteamentos, enchimentos, reparos e substituição de materiais, na proteção de taludes e cristas de barragens de terra e enrocamento, na construção de diques e ensecadeiras, na melhoria das condições de fundação, na execução de pavimentos e estradas, entre outras aplicações possíveis.

As barragens em concreto compactado com rolo devem ser utilizadas como alternativa em locais onde existem jazidas de agregados a uma distância de transporte econômica e em locais com fundação que apresente resistência e impermeabilidade satisfatória.

Considerando as barragens de CCR como alternativa em relação às barragens de terra e de enrocamento, o CCR resulta em menores volumes de escavações, de lançamentos de materiais, menor tempo de exposição das estruturas e maior rapidez construtivas, gerando, assim, arranjos com estruturas mais compactas e otimizadas. Outro aspecto vantajoso é que as obras em concreto rolado podem sofrer galgamento em caso de ocorrência de cheias superiores às previstas no projeto.

O ganho significativo na velocidade construtiva permite a otimização do prazo construtivo, reduzindo os juros a serem pagos pelo capital investido e resultando numa alternativa de baixo custo global.

Com o recente surgimento de novas técnicas e métodos construtivos, o CCR alcançou maior agilidade e economia de custo.

O CCR enriquecido com argamassa (GERCC), desenvolvido para ser utilizado nos paramentos hidráulicos, foi utilizado com sucesso nas barragens de Yantan, Rongdi, Puding, Dachaoshan (ambas na China), Cadiangullong (Austrália), Horseshoe Bend (Nova Zelândia) e Tannur (Jordânia). Os principais benefícios observados nessas obras foram: redução no tempo de execução, menor volume de mão-de-obra, facilidade de construção, menor necessidade de equipamentos e redução nos custos.

Apesar de diversas barragens, especialmente na China, terem sido realizadas com a utilização do próprio CCR nos paramentos de montante e de jusante, não se sedimentou no Brasil, ainda, conhecimento suficiente da tecnologia do CCR enriquecido com argamassa (GERCC). Estudos de conhecidas e conceituadas empresas estão em andamento, mas até o momento não foram exploradas efetivamente as vantagens de tal método construtivo. A falta de experiência nesse campo por parte das empresas nacionais resulta, muitas vezes, na escolha de métodos menos econômicos e com tempo de execução mais prolongado.

O método rampado foi concebido na barragem de Jiangya, na China, ocasião em que essa alternativa construtiva resultou como principais vantagens: melhor ligação entre as camadas de CCR; redução do número de camadas de ligação horizontais; redução do trabalho de limpeza, tratamento e aplicação da argamassa de ligação; limitação do número de juntas frias, deslocamento do tratamento da junta de ligação para fora do caminho crítico; eliminação da água e impurezas na área de lançamento em andamento; otimização na utilização de formas nos paramentos, redução do potencial do concreto rolado ganhar calor em condições ambientes quentes; e aumento das taxas de lançamento global de concreto compactado com rolo.

Paralelamente aos resultados obtidos na China, o que se obteve na UHE Lajeado vem confirmar a vantagem de se utilizar o método rampado em substituição ao tradicional lançamento de concreto compactado com rolo em longas camadas horizontais. Um aspecto importante, motivo de preocupação, relacionou-se à temperatura do concreto, uma vez que com o método rampado as camadas são inclinadas e sucessivas, com rapidez de execução, podendo originar maior pico de temperatura do concreto. Porém, na ocasião foi relatado que a diferença de elevação da temperatura do concreto compactado com rolo do método tradicional para o método rampado foi considerada insignificante. Outro aspecto

importante observado na UHE Lajeado foi que o custo unitário final do CCR rampado atingiu valores de aproximadamente 70% da metodologia tradicional de CCR em camadas horizontais.

Diante desses resultados, é seguro afirmar que o método rampado tornou-se uma forte opção construtiva para barragens em concreto compactado com rolo.

A construção e os projetos de barragens em CCR continua sofrendo mudanças. Novas idéias para melhorar o desempenho e reduzir custos vêm dos projetistas e dos contratantes. Um dos propósitos deste trabalho foi o de proporcionar opções novas e variadas com respeito às metodologias construtivas possíveis no CCR.

Fica como sugestão para futuros trabalhos que sejam investigadas as performances dos métodos (método rampado e GERCC) apresentados neste trabalho, já que são metodologias construtivas relativamente novas, sobre as quais não possuímos ainda segurança quanto ao seu desempenho para idades de controle mais avançadas.

Capítulo 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, J. V. A.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 44., 2002, Belo Horizonte, ago. 2002. p. 154.

ALVES, I. A.; DONADON, J. M. O CCR empregado como solução num caso real onde havia escassez de prazo na execução do projeto. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO*, 3., 1998, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu, nov. 1998. p. 54-57.

ANDRADE, M. A. S.; CARMO, J. B. M.; BITTENCOURT, R. M. *et al.* Concreto compactado com rolo realizado como camada final de pavimento rodoviário. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*. 44., 2002, Belo Horizonte, ago. 2002. p. 139.

ANDRIOLO, F. R.; BLINDER, S.; KREMPEL, A. F. Comparação de custos do CCR a partir de vários projetos. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO*, 3., 1998, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu, nov. 1998. p. 9-20.

ANDRIOLO, F. R. Barragens de CCR – Discussões Relacionadas ao projeto, planejamento da construção, controle de qualidade e suas inter-relações. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO*, 3., 1998, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu, nov. 1998. p. 21-25.

ANDRIOLO, F. R. *The use of roller compacted concrete*. São Paulo: Oficina de Textos. 1998.

ANDRIOLO, F.R. *Contribuições para o conhecimento e desenvolvimento do concreto rolado*. São Paulo: Barber-Greene. 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 6023. Referências bibliográficas*. Rio de Janeiro. 1989.

BATISTA, E. L.; GRAÇA, N. G.; PACELLI, W. A. *et al.* Execução de concreto compactado com rolo rampado em Lajeado – Consolidação da experiência. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*. 44., 2002, Belo Horizonte, ago. 2002. p. 146.

BATISTA, E. L.; GRAÇA, N. G.; BITTENCOURT, R. M. *et al.* Estudos do concreto compactado para face de barragens – Ensaios executados *in situ*. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*. 44., 2002, Belo Horizonte, ago. 2002. p. 144.

CEMIG. *Barragens de concreto compactado*. Belo Horizonte: Superintendência de Projetos de Geração. 1987.

CHANGQUAN, J.; ZIDA, D.; LICHEN, Y.; KANGNING, Y. The horizontally advancing sloped layer construction of RCC. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RCC DAM*, 1999: Chengdu. *Proceedings...* China, apr.1999. v. II. p. 768-776.

CRUZ, P. T. *100 Barragens brasileiras – Casos históricos, materiais de construção, projeto*. São Paulo: Oficina de Textos. 1996.

DAMS AND DEVELOPMENT. *A new framework for decision – Making*. World Commission on Dams. London: Earthscan Publications, 2000.

DONADON, J. M. Rapidez, economia, galgamentos – Na construção de Salto Caxias o CCR conseguiu ser bom em tudo. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO*, 3., 1998, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu, nov. 1998. p. 152-158.

EQUIPE DE FURNAS; PACELLI, W. A. (Ed.). *Concretos – Massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e propriedades*. São Paulo. PINI, 1997.

FARIAS, L. F.; LOPES, A. N. M.; ANDRADE, M. A. S. *et al.* UHE Cana Brava – Análise comparativa entre o concreto compactado com rolo de laboratório e de campo. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*. 44., 2002, Belo Horizonte, ago. 2002. p. 237.

FORBES, B. A.; ISKANDER, M. M; MALKAWI, A. I. H. High RCC standards achieved at Jordan's Tannur Dam. *International Journal on Hydropower and Dams*, v. 8, issue 3, p. 58-62, jun. 2001.

FORBES, B. A. Solving some long-standing RCC concerns. *International Journal on Hydropower and Dams*, v. 7, issue 3, p. 52-54, jun. 2000.

FORBES, B. A. Grout enriched RCC: A history and future. *International Water Power & Dam Construction*. UK, p. 34-38, jun. 1999.

FORBES, B. A.; LICHEN, Y.; GUOJIN, T.; KANGNING, Y. Jiangya Dam, China. Some interesting techniques developed for high quality RCC construction. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RCC DAM, 1999: Chengdu. Proceedings...* China, apr. 1999. v.II. p. 716-729.

FRANCO, F. R.; KRUM, S. M.; ARAUJO, T. A. *et al.* Barragem Val de Serra – Aspectos de projeto. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO*, 3., 1998, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu, nov. 1998. p. 107-114.

FRANCO, F. R.; CESCA, R. J.; ARAUJO, T. A. *et al.* Barragem Val de Serra – Aspectos de construção. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO*, 3., 1998, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu, nov. 1998. p. 126-133.

GENTILE, G. Study, preparation, and placement of low cement concrete, with special regard to its use in solid gravity dams. *In: ICOLD CONGRESS, 8., 1964, Edinburgh. 1964, v. III, p. 259-277.*

GOLIK, M. A.; DE JESUS, N. F. CCR para PCH's, por quê? U. H. Elétrica Rio do Peixe, uma realidade. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 3., 2002, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu, 2002. p. 144-147.*

GRAHAM, J. R. *Roller compacted concrete for gravity dams – State of the Art. Bulletin 75. Paris: CIGB – ICOLD. 1989.*

HANSEN, K. D. *Up-to-date with RCC. International Water Power & Dam Construction, UK, nov. 2000.*

HANSEN, K. D.; BASS, R. How old dams are reborn. *International Water Power & Dam Construction, UK, jun. 1999.*

HANSEN, K. D.; REINHARDT, W. G. *Roller-compacted concrete dams. New York: McGraw-Hill, 1991.*

HANSEN, K. D.; GUICE, L. K. (Ed.). *Roller compacted concrete II. San Diego: ASCE, 1988.*

HANSEN, K. D. (Ed.). *Roller compacted concrete. Denver: ASCE, 1985.*

KREMPEL, A. F.; ANDRIOLO, F. R. Barragens em CCR – Especificações técnicas: pontos de interesse, conflito e discussões. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, 2., 1996, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu, nov. 1996. p. 9-17.*

KRUGER, D. A. V.; MACHADO, R. D.; MARINO, M. A. Avaliação térmica de barragens de concreto executadas em camadas. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE*

PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 3., 2002, Foz do Iguaçu. *Anais...* Curitiba. *Anais...* Curitiba, abr. 2002. p. 129-143.

KUPERMAN, S. C. Barragens brasileiras de concreto compactado com rolo – Passado, presente e futuro. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, 2., 1996, Curitiba. Anais...* Curitiba, 1996. p. 240-255.

LEVIS, P.; MAGNAVACA, R.; MUSSI, J. M. *et al.* Esquema de desvio do Rio Iguaçu da usina de Salto Caxias e ocorrência de galgamentos programados da barragem. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, 3., 1998, Foz do Iguaçu. Anais...* Foz do Iguaçu, nov. 1998. p. 126-133.

OLIVEIRA, P. J.; SALLES, F. M. Concreto compactado com rolo – Características e propriedades. *In: SIMPÓSIO DE OBRAS EM CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, 1., 1995, São Paulo. Anais...* São Paulo, abr. 1995. p. 187-208.

PACELLI, W. A.; MARQUES, J. F.; STEFFEN, R. D. *et al.* Execução de aterros experimentais de CCR em laboratório, programa de ensaios. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, 3., 1998, Foz do Iguaçu. Anais...* Foz do Iguaçu, nov. 1998. p.324-328.

PACELLI, W. A.; ANDRIOLO, F. R. Barragens em CCR – Sistemas de impermeabilização: discussões, sugestões e uso. SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, 2., 1996, Curitiba. *Anais...* Curitiba, 1996. p. 178-186.

PIMENTA, G. V.; ANDRIOLO, F. R. Importância do planejamento nas obras em CCR. SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, 2., 1996, Curitiba. *Anais...* Curitiba, 1996. p. 86-93.

RAPHAEL, J. M. The optimum gravity dam. *In: RAPID CONSTRUCTION OF CONCRETE DAMS. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1970: New York. Proceedings...* New York, 1970. p. 221-247.

RAPHAEL, J. M. Construction methods for the soil-cement dam. *In: ECONOMICAL CONSTRUCTION OF CONCRETE DAMS. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1972: New York. Proceedings... New York, 1972. p. 217.*

RIBEIRO, A. B.; ALMEIDA, I. R. Módulo de elasticidade de concreto compactado a rolo. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. 44., 2002, Belo Horizonte, ago. 2002. p. 220.*

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. *Manual prático de escavação – Terraplenagem e escavação de rocha. São Paulo: PINI, 1990.*

SEMBENELLI, P.; SHENGPEI, W. Chinese experience in the design and construction of RCC arch dams. *The International Journal on Hidropower & Dams, UK, 1998.*

TODRES, H. A.; WU, C. L.; TARR, S. M. Improving roller compacted concrete pavement technology: construction. *PCA R&D Serial, Illinois, n. 2.014, 1995.*

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Roller-compact concrete – Engineering and Design. *Engineer Manual EM1110-2-2006, Washington, DC. 15 jan. 2000.*

WAGNER, C. Tannur Dam – Paving the way for RCC in Jordan. *International Water Power & Dam Construction, UK, p. 34-35, mar. 2001.*

WALLINGFORD, V. M. Proposed new technique for construction of concrete gravity dams. *In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS. 10., 1979: Montreal. Proceedings... Montreal, 1979. v. 4, p. 439-452.*

YEARBOOK 1999. *International Water Power & Dam Construction, UK, 1999, p.112.*

ZIDA, D.; LAN, M. Construction of Jiangya RCC Dam. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RCC DAM.,1999: Chengdu. Proceedings... Chengdu, 1999. v. II p. 759-767.*