

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

TESE DE DOUTORADO

**MACIÇOS EXPERIMENTAIS DE LABORATÓRIO DE
CONCRETO COMPACTADO COM ROLO APLICADO ÀS
BARRAGENS**

JOSÉ MARQUES FILHO

Orientadora: Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Orientador Prof. Vladimir Antonio Paulon

Porto Alegre
2005

JOSÉ MARQUES FILHO

**MACIÇOS EXPERIMENTAIS DE LABORATÓRIO DE
CONCRETO COMPACTADO COM ROLO APLICADO ÀS
BARRAGENS**

Tese apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Construção Civil.

Orientadores:

Prof. Dr. Denise C. C. Dal Molin

Prof. Dr. Vladimir A. Paulon

**Porto Alegre
Outubro de 2005**

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof. Vladimir Antonio Paulon
Dr. pela Universidade de São Paulo
Orientador

Prof. Dr. Fernando Schnaid
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Banca Examinadora:

Selmo Chapira Kuperman
Dr. pela Universidade de São Paulo

Marcos Antonio Marino
Ph.D. pela The University of New Mexico

Nilo César Consoli
Ph.D. pela Concordia University - Canadá

Angela Borges Masuero
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

DEDICATÓRIA

À minha esposa Eugenia Maria e aos meus filhos Amanda Maria e José Lucas, luzes e razão da minha existência, que deram apoio incondicional ao sonho de um pai de família, sem nunca exprimir qualquer gesto ou palavra de desgosto pelo tempo roubado de seu convívio.

AGRADECIMENTOS

À Professora Denise C. C. Dal Molin pela orientação competente em todas as fases do doutorado, com grande compreensão do ser humano e com demonstrações tocantes de amizade.

Ao Professor Vladimir Antonio Paulon, conhecedor profundo de concreto aplicado às barragens, que além de orientador em todas as horas, foi suporte nos momentos difíceis e um amigo a ser reverenciado.

Ao Professor Paulo Monteiro pelas valiosas contribuições a esta tese, pelo incentivo constante e pelo apoio nos momentos difíceis.

Ao Engenheiro Walton Pacelli de Andrade, que admiro pela altíssima competência técnica em concreto de obras hidráulicas, grande amigo e incentivador, sem o qual o projeto de pesquisa e desenvolvimento executado no Programa da ANEEL, que permitiu a execução deste trabalho não existiria.

Aos amigos de todos os momentos que através do incentivo e apoio tornaram a aridez do doutorado suportável, José Carlos Loureiro, José de Almendra Freitas Júnior, Mahmoud Farghaly e Ruy Dikram Steffen.

Ao Engenheiro Maurice Antoine Traboussi, pela competência e dedicação nos ensaios desta tese, ao qual aprendi a respeitar e nutrir grande amizade.

À diretoria da COPEL, Companhia Paranaense de Energia por todo apoio recebido durante o desenvolvimento do doutorado, notadamente ao Engenheiro Mário Roberto Bertoni e Administrador Gilberto Serpa Griebeler.

Aos professores do Departamento de Construção Civil pelo apoio durante o afastamento das aulas regulares do Curso, notadamente os professores Ricardo Mendes Júnior, Marcos Antonio Marino e o grupo de Materiais de Construção Civil.

Aos colegas da COPEL Participações e da Coordenação de Gestão de Ativos em Sociedade, pela cooperação, amizade, carinho e incentivo incondicional durante todo o período de desenvolvimentos das atividades necessárias à obtenção do título de doutor, especialmente meus superiores imediatos Engenheiro Antonio Sérgio Guetter e Engenheiro Sérgio Montenegro Kraemer.

Ao Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S. A., especialmente ao amigo Engenheiro Rubens Bittencourt.

À Dona Francisca Energética S. A., DFESA, pelo apoio, especialmente ao seu presidente da época, Engenheiro Nivaldo de Almeida Neto.

Ao Engenheiro Joaquim Franco Filho, coordenador geral do Consórcio Ivaí-Torno, pelo apoio e estímulo ao trabalho desenvolvido e pela amizade demonstrada em todos estes anos.

À Agência Nacional de Energia Elétrica e à Furnas Centrais Elétricas S.A., por proporcionarem a oportunidade do desenvolvimento desta pesquisa.

À Engenheira Fernanda Risseto Delfino Candeco pelo paciente auxílio no trabalho gráfico desta tese, bem como aos grandes amigos e engenheiros Ruy Fernando Sant'Ana e os mencionados Maurice, Farghaly e José Freitas, e minha esposa Eugenia Maria Sobral Marques pela leitura e auxílio na revisão ortográfica deste trabalho.

Aos meus amigos e familiares pela demonstração de apreço e paciência com alguém que diminuiu o convívio e o contato por mais de três anos.

Especial agradecimento deve ser feito ao saudoso Técnico Guilherme Leroy pelo desenvolvimento técnico e executivo do equipamento climatizador da superfície de camada, proposto nesta tese.

"A sabedoria não nos é dada. É preciso descobri-la por nós mesmos, depois de uma viagem que ninguém nos pode poupar ou fazer por nós".

Marcel Proust

"As dificuldades, como as montanhas, aplainam-se quando avançamos por elas".

Émile Zola

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | IMPORTÂNCIA DA PESQUISA | 5 |
| 1.2 | OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS | 7 |
| 1.2.1 | <i>Objetivo Geral</i> | 7 |
| 1.2.2 | <i>Objetivos Específicos</i> | 7 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 8 |
| 2 | BARRAGENS DE CCR..... | 10 |
| 2.1 | HISTÓRICO E APLICAÇÕES..... | 10 |
| 2.1.1 | <i>Histórico da utilização de Barragens de Concreto</i> | 10 |
| 2.1.2 | <i>Evolução Histórica da Técnica do CCR Aplicado às Barragens</i> | 11 |
| 2.2 | BARRAGENS DE CONCRETO..... | 20 |
| 2.2.1 | <i>Concreto Massa</i> | 23 |
| 2.2.2 | <i>Variações Volumétricas e Fissuração de Origem Térmica</i> | 25 |
| 2.2.2.1 | <i>Avaliação dos Efeitos Térmicos e Fissuração Térmica</i> | 26 |
| 2.2.3 | <i>Permeabilidade e Percolação</i> | 31 |
| 2.2.4 | <i>Aditivos</i> | 34 |
| 2.2.5 | <i>Segurança</i> | 36 |
| 2.2.6 | <i>Barragens em Arco</i> | 46 |
| 2.3 | BARRAGENS DE CCR - CONCEITUAÇÃO GERAL | 47 |
| 2.4 | IMPACTO DO PROCESSO EXECUTIVO DO CCR NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO | 51 |
| 2.4.1 | <i>Características Gerais de Obra</i> | 52 |
| 2.4.2 | <i>Conceitos Iniciais</i> | 54 |
| 2.4.2.1 | <i>Dosagem e estudos Prévios de Laboratório</i> | 55 |
| 2.4.2.2 | <i>Ensaio para avaliação da Trabalhabilidade</i> | 56 |
| 2.4.2.3 | <i>Ensaio para a Avaliação da Resistência aos Esforços Mecânicos</i> | 57 |
| 2.4.3 | <i>Abordagens para Estudos de Dosagem</i> | 59 |
| 2.4.4 | <i>Controle da Qualidade</i> | 65 |
| 2.4.5 | <i>Aspectos Construtivos</i> | 68 |
| 2.4.5.1 | <i>Soluções para a Face de Montante</i> | 73 |
| 2.4.5.2 | <i>Juntas de Contração</i> | 78 |
| 2.4.5.3 | <i>Demais Interferências</i> | 80 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.4.6 | <i>Dúvidas Conceituais Importantes</i> | 81 |
| 2.4.7 | <i>Previsão de Parâmetros</i> | 83 |
| 2.4.8 | <i>Maçiços Experimentais</i> | 84 |
| 2.4.9 | <i>Perspectivas de Futuro e Pesquisa</i> | 89 |
| 2.4.9.1 | Barragens em arco | 90 |
| 2.4.9.2 | Soluções da face de montante | 92 |
| 2.4.9.3 | Concreto Rampado ou Método Chinês | 93 |
| 2.4.9.4 | Novas tecnologias para avaliação da necessidade de preparação de camada | 96 |
| 3 | ENSAIOS ESPECÍFICOS E ESPECIAIS PARA BARRAGENS DE CCR | 98 |
| 3.1 | ENSAIO PARA MEDIDA DE PERMEABILIDADE | 98 |
| 3.2 | MASSA UNITÁRIA DO CCR COMPACTADO ATRAVÉS DO APARELHO DE VEBE E <i>CANNON</i> <i>TIME</i> | 101 |
| 3.3 | MASSA UNITÁRIA E TEOR DE ÁGUA UNITÁRIA ATRAVÉS DO APARELHO DE DMA | 103 |
| 3.4 | PERMEABILIDADE DO CONCRETO FRESCO..... | 104 |
| 3.5 | RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL..... | 105 |
| 3.6 | RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA..... | 107 |
| 3.7 | MÓDULO DE ELASTICIDADE | 110 |
| 3.8 | CISALHAMENTO DIRETO | 111 |
| 3.9 | MOLDAGEM DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DE CCR..... | 114 |
| 3.10 | DENSÍMETRO NUCLEAR..... | 116 |
| 4 | DOSAGEM DE CCR COM ALTO TEOR DE FINOS..... | 118 |
| 4.1 | GRADUAÇÕES GEOMÉTRICAS..... | 119 |
| 4.2 | CURVAS DE REFERÊNCIA DE TALBOT-RICHARD..... | 120 |
| 4.3 | CURVAS DE REFERÊNCIA DO ACI COMMITTEE 207..... | 121 |
| 4.4 | CURVAS GRANULOMÉTRICAS CÚBICAS..... | 122 |
| 4.5 | LEI DE SLATER LYSE | 122 |
| 4.6 | PROCEDIMENTO DE DOSAGEM DE CCR COM ALTO TEOR DE FINOS | 122 |
| 4.6.1 | <i>Escolha e caracterização dos materiais</i> | 125 |
| 4.6.2 | <i>Combinação do material cimentício</i> | 126 |
| 4.6.3 | <i>Combinação de agregados e ajuste à granulometria de referência</i> | 127 |
| 4.6.4 | <i>Definição das Misturas Experimentais</i> | 129 |
| 4.6.5 | <i>Verificação da trabalhabilidade e capacidade de compactação</i> | 130 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.6.6 | <i>Ensaio com o concreto fresco e preparação de corpos-de-prova para ensaios de concreto endurecido</i> | 132 |
| 4.6.7 | <i>Gráficos de Dosagem</i> | 132 |
| 4.6.8 | <i>Escolha dos traços adequados</i> | 133 |
| 5 | PROGRAMA EXPERIMENTAL | 134 |
| 5.1 | EQUIPAMENTO PARA COMPACTAÇÃO DE CCR EM LABORATÓRIO..... | 137 |
| 5.1.1 | <i>Aparato para Cura no Intervalo entre Camadas (Climatizador)</i> | 140 |
| 5.1.2 | <i>Extração de Testemunhos</i> | 142 |
| 5.2 | PROJETO DE EXPERIMENTOS | 149 |
| 5.2.1 | <i>Análise da Envoltória de Resistência entre Camadas</i> | 150 |
| 5.2.2 | <i>Avaliação da Influência da Posição Relativa dentro do Maciço Experimental – Programa Experimental Complementar I</i> | 152 |
| 5.2.3 | <i>Estudo com Corpos-de-prova Prismáticos – Programa Experimental Complementar II</i> | 153 |
| 5.2.4 | <i>Resumo dos Maciços Experimentais Necessários às Matrizes Experimentais Propostas</i> | 154 |
| 5.3 | ENSAIOS NOS MACIÇOS EXPERIMENTAIS | 156 |
| 5.4 | SEQÜÊNCIA DE EXECUÇÃO DOS MACIÇOS EXPERIMENTAIS | 160 |
| 5.5 | CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS..... | 167 |
| 5.5.1 | <i>Cimento</i> | 168 |
| 5.5.2 | <i>Agregado Graúdo e Miúdo</i> | 168 |
| 5.6 | DOSAGENS DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR) E ARGAMASSAS. | 171 |
| 5.6.1 | <i>Concreto compactado com rolo</i> | 171 |
| 5.6.2 | <i>Argamassa</i> | 171 |
| 6 | RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS PARA A MATRIZ EXPERIMENTAL PROPOSTA | 173 |
| 6.1 | RESULTADOS DOS CORPOS-DE-PROVA MOLDADOS PARA CONTROLE DOS MACIÇOS EXPERIMENTAIS | 174 |
| 6.1.1 | <i>Resultados do Programa Experimental</i> | 174 |
| 6.1.2 | <i>Resistência à Compressão – Controle da Qualidade no Protótipo</i> | 181 |
| 6.2 | RESULTADOS DOS ENSAIOS EM TESTEMUNHOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DA ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA ENTRE CAMADAS..... | 181 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.2.1 | <i>Ensaio para Determinação das Resistências à Compressão e à Tração, Massa Específica e Módulo de Elasticidade</i> | 182 |
| 6.2.2 | <i>Ensaio de Cisalhamento Direto</i> | 184 |
| 6.2.2.1 | <i>Maciço de CCR fora da Junta</i> | 185 |
| 6.2.2.2 | <i>Análise da Envoltória de Experimento entre Camadas – Resultados dos Ensaio de Cisalhamento Direto</i> | 187 |
| 6.3 | AVALIAÇÃO DA POSIÇÃO RELATIVA NO MACIÇO – PROGRAMA EXPERIMENTAL COMPLEMENTAR I | 201 |
| 6.4 | RESULTADOS CORPOS-DE-PROVA PRISMÁTICOS – PROGRAMA EXPERIMENTAL COMPLEMENTAR II | 209 |
| 6.5 | COMPARAÇÃO DE RESULTADOS | 216 |
| 6.5.1 | <i>Parâmetros de Resistência do Maciço de CCR entre juntas</i> | 216 |
| 6.5.2 | <i>Parâmetros de Resistência do Maciço de CCR Comparados com Testemunhos do Protótipo</i> | 222 |
| 6.5.3 | <i>Comparação dos Resultados dos Ensaio de Cisalhamento Direto</i> | 223 |
| 6.5.4 | <i>Considerações sobre as Comparações Efetuadas</i> | 227 |
| 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 230 |
| 7.1 | CONCLUSÕES | 230 |
| 7.2 | SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS | 233 |
| | REFERÊNCIAS CITADAS | 236 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------------|--|----|
| FIGURA 2.1 | Fotografias Panorâmicas da Barragem de Miel I..... | 14 |
| FIGURA 2.2 | Barragem da Derivação do Rio Jordão no Final da Construção..... | 17 |
| FIGURA 2.3 | Vista Geral da UHE Salto Caxias | 17 |
| FIGURA 2.4 | Vista Geral da UHE Dona Francisca | 18 |
| FIGURA 2.5 | Vista Geral de Jusante da Barragem de Santa Clara..... | 19 |
| FIGURA 2.6 | Vista Geral de Jusante da Barragem de Dona Francisca durante a Construção | 19 |
| FIGURA 2.7 | Planta e Corte Longitudinal de Barragem de Concreto a Gravidade..... | 20 |
| FIGURA 2.8 | Seção Transversal Típica de Barragem de Concreto a Gravidade..... | 21 |
| FIGURA 2.9 | Seção Transversal Esquemática Típica – Barragem de Concreto a Gravidade..... | 22 |
| FIGURA 2.10 | Coeficientes de Restrição considerando a Fundação Infinitamente Rígida | 30 |
| FIGURA 2.11 | Seção Típica de Barragem Vertedouro de Concreto à Gravidade..... | 34 |
| FIGURA 2.12 | Consumos de Água para vários Diâmetros Máximos do Agregado Considerando a Presença de Aditivo Incorporador de Água..... | 35 |
| FIGURA 2.13 | Diagramas de Tensões em Barragens de Concreto à Gravidade | 40 |
| FIGURA 2.14 | Vista da Barragem de Glen Canyon Rio Colorado, Arizona, EUA..... | 47 |
| FIGURA 2.15 | Equipamento para transporte de CCR usado em Miel I | 49 |
| FIGURA 2.16 | Detalhe Esquemático de Praça de CCR..... | 50 |
| FIGURA 2.17 | Praça Típica da Barragem de Salto Caxias | 51 |
| FIGURA 2.18 | Aparelho Vebe Modificado | 56 |
| FIGURA 2.19 | Moldagem e Compactação em Mesa Vibratória de Corpos-de-prova de CCR | 58 |
| FIGURA 2.20 | Ensaio de Tração Direta..... | 59 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| FIGURA 2.21 | Ensaio de Permeabilidade do Concreto Fresco..... | 64 |
| FIGURA 2.22 | Dispositivo para Medida do Teor de Água (DMA)..... | 66 |
| FIGURA 2.23 | Densímetro Nuclear | 67 |
| FIGURA 2.24 | Seção Transversal Típica de uma Barragem de CCR a Gravidade | 68 |
| FIGURA 2.25 | Limpeza e Tratamento de Fundações de Miel I..... | 69 |
| FIGURA 2.26 | Vista Geral da Praça de CCR da UHE Salto Caxias..... | 70 |
| FIGURA 2.27 | Vista Geral de Praça de CCR da UHE Salto Caxias– Em Primeiro Plano Utilização do Densímetro Nuclear..... | 70 |
| FIGURA 2.28 | Visão Geral de Barragem de CCR em Construção – A Montante se vê a Face de Concreto Convencional Utilizando a Técnica de Formas Deslizantes da UHE Salto Caxias | 71 |
| FIGURA 2.29 | Detalhe de Espalhamento de Argamassa, Face de Montante e Juntas de Contração | 71 |
| FIGURA 2.30 | Detalhe da Praça de CCR de Miel I..... | 72 |
| FIGURA 2.31 | Detalhe da Praça de CCR da Barragem de Dona Francisca | 72 |
| FIGURA 2.32 | Instalação de Manta de PVC na Face de Montante de Miel I..... | 74 |
| FIGURA 2.33 | Detalhe da Face de Montante no Processo da “Árvore de Natal” | 75 |
| FIGURA 2.34 | Face de Montante com Processo da “Árvore de Natal” da Barragem da Derivação do Rio Jordão..... | 76 |
| FIGURA 2.35 | Execução de Junta de Contração pela Aplicação Prévia de Manta Não Aderente..... | 79 |
| FIGURA 2.36 | Corte Mecânico de Junta em Miel I..... | 79 |
| FIGURA 2.37 | Execução da Face de Jusante da Barragem da Derivação do Rio Jordão..... | 80 |
| FIGURA 2.38 | Face de Jusante com Vertedouro em Degraus da UHE Dona Francisca | 81 |
| FIGURA 2.39 | Maciço Experimental no Campo da UHE Salto Caxias | 85 |
| FIGURA 2.40 | Vista Geral do Equipamento para Compactação em Laboratório | 86 |
| FIGURA 2.41 | Vista Superior do Equipamento de Compactação em Laboratório..... | 86 |
| FIGURA 2.42 | Maciço Experimental de Laboratório - Corpo-de-Prova Típico..... | 87 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| FIGURA 2.43 | Vista de jusante da Barragem de Puding, China..... | 91 |
| FIGURA 2.44 | Vista Lateral do Processo do CCR Rampado | 94 |
| FIGURA 2.45 | Perspectiva do Método Chinês Rampado | 94 |
| FIGURA 2.46 | Aplicação do CCR Rampado na UHE Lajeado..... | 95 |
| FIGURA 2.47 | Face de Jusante da Barragem da UHE Santa Clara | 96 |
| FIGURA 3.1 | Equipamento para Ensaios de Permeabilidade à Água..... | 98 |
| FIGURA 3.2 | Representação Esquemática de Equipamento para Ensaio de Permeabilidade..... | 99 |
| FIGURA 3.3 | Seqüência de Tarefas para Determinação do <i>Cannon Time</i> | 102 |
| FIGURA 3.4 | Determinação da Massa Unitária Compactada..... | 102 |
| FIGURA 3.5 | Ensaio com DMA | 104 |
| FIGURA 3.6 | Ensaio de Permeabilidade do Concreto Fresco. Moldagem do Corpo-de- prova e Ensaio em Execução | 105 |
| FIGURA 3.7 | Obtenção de Testemunhos Horizontais nas Juntas entre Camadas de Concretagem | 106 |
| FIGURA 3.8 | Ensaio de Tração por Compressão Diametral Determinando a Resistência à Tração da Junta entre Camadas | 106 |
| FIGURA 3.9 | Ensaio à Tração Direta Utilizando o Dispositivo Leroy..... | 108 |
| FIGURA 3.10 | Ensaio de Resistência à Tração Direta Desenvolvido no LAME | 109 |
| FIGURA 3.11 | Ensaios para Determinação da Resistência à Tração Direta Executados por RIBEIRO, em 2002..... | 110 |
| FIGURA 3.12 | Ensaio para Determinação do Módulo de Elasticidade | 110 |
| FIGURA 3.13 | Envoltória de Mohr-Coulomb..... | 111 |
| FIGURA 3.14 | Desenho Esquemático do Arranjo para Ensaio de Cisalhamento..... | 112 |
| FIGURA 3.15 | Equipamento para Ensaio de Cisalhamento Direto | 113 |
| FIGURA 3.16 | Corpo-de-prova Confinado na Caixa de Cisalhamento | 113 |
| FIGURA 3.17 | Curva Tensão de Cisalhamento × Deslocamento Horizontal Típica..... | 114 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| FIGURA 3.18 | Adensamento de Corpo-de-prova com Martelete Tipo Kango..... | 115 |
| FIGURA 3.19 | Corpos-de-prova Adensados em Mesa Vibratória..... | 115 |
| FIGURA 3.20 | Representação Esquemática de Utilização do Densímetro Nuclear | 116 |
| FIGURA 3.21 | Utilização do Densímetro Nuclear - UHE Lajeado | 117 |
| FIGURA 3.22 | Utilização do Densímetro Nuclear durante a Execução de Maciço Experimental em Laboratório | 117 |
| FIGURA 4.1 | Volumes Absolutos dos Componentes dos Concretos Utilizados na barragem de Itumbiara | 123 |
| FIGURA 4.2 | Faixa Granulométrica de Referência baseada na curva cúbica..... | 127 |
| FIGURA 4.3 | Comparação de curvas Granulométricas | 128 |
| FIGURA 4.4 | Determinação do <i>Cannon Time</i> em Fase Inicial, Intermediária e no Final do Processo | 131 |
| FIGURA 5.1 | Detalhe da Lateral do Maciço Experimental durante a Compactação..... | 138 |
| FIGURA 5.2 | Topo de Camada recém Compactada em Maciço Experimental no Laboratório..... | 138 |
| FIGURA 5.3 | Compactação Manual da Lateral de Camada do Maciço Experimental em Laboratório..... | 139 |
| FIGURA 5.4 | Regularização do Topo da Camada com Vibro-acabadora Manual | 139 |
| FIGURA 5.5 | Vista Geral do Aparato para Controle Ambiental | 141 |
| FIGURA 5.6 | Equipamento Embutido no Aparato para Controle Ambiental..... | 141 |
| FIGURA 5.7 | Aparato para Controle Ambiental Instalado | 142 |
| FIGURA 5.8 | Plataforma para Perfuração e Obtenção de Testemunhos | 144 |
| FIGURA 5.9 | Detalhe do Início do Processo de Perfuração | 145 |
| FIGURA 5.10 | Seqüência de Furos de Sondagem | 145 |
| FIGURA 5.11 | Retirada do Testemunho do Furo..... | 146 |
| FIGURA 5.12 | Extração de Testemunhos na Posição Horizontal..... | 146 |
| FIGURA 5.13 | Corte com Serra de Fio Diamantado..... | 147 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| FIGURA 5.14 | Usinagem de Testemunhos para Obtenção de Corpos-de-prova..... | 147 |
| FIGURA 5.15 | Aspecto dos Topos dos Corpos-de-Prova Obtidos de Testemunhos após a Usinagem | 148 |
| FIGURA 5.16 | Acabamento nos topos dos testemunhos com argamassa..... | 148 |
| FIGURA 5.17 | Apicoamento do Topo da Camada Simulando Corte com Jato de Alta Pressão | 151 |
| FIGURA 5.18 | Vista Geral do Tratamento do Topo da Camada com a Metade da Esquerda com Limpeza com Ar Comprimido e a da Direita com Apicoamento | 151 |
| FIGURA 5.19 | Corpo-de-Prova Prismático Após Ruptura e Câmara de Ensaio de Cisalhamento | 154 |
| FIGURA 5.20 | Plano de extração dos maciços experimentais números de 01 a 06..... | 158 |
| FIGURA 5.21 | Plano de extração dos maciços experimentais números de 07 a 10..... | 159 |
| FIGURA 5.22 | Pesagem dos Materiais e Abastecimento da Betoneira de 1,5 m ³ | 160 |
| FIGURA 5.23 | Sala de Dosagem e Carregamento da Betoneira..... | 161 |
| FIGURA 5.24 | Descarga Pós-mistura | 161 |
| FIGURA 5.25 | Homogeneização do CCR..... | 161 |
| FIGURA 5.26 | Lançamento e Espalhamento | 162 |
| FIGURA 5.27 | Compactação das Extremidades do Maciço Experimental..... | 162 |
| FIGURA 5.28 | Medição da Altura da Camada Após Compactação das Extremidades | 162 |
| FIGURA 5.29 | Vista Geral do Equipamento no Início da Compactação..... | 163 |
| FIGURA 5.30 | Execução de Furo para utilização de Densímetro Nuclear | 163 |
| FIGURA 5.31 | Medição da Massa Específica do CCR com Utilização do Densímetro Nuclear..... | 163 |
| FIGURA 5.32 | Desforma da Maciço Experimental | 164 |
| FIGURA 5.33 | Continuação da Desforma com Auxílio da Ponte Rolante | 165 |
| FIGURA 5.34 | Colocação na Câmara Úmida | 165 |
| FIGURA 5.35 | Vista Geral da Estocagem na Câmara Úmida..... | 165 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| FIGURA 5.36 | Vista geral da extração..... | 166 |
| FIGURA 5.37 | Retirada de testemunho..... | 166 |
| FIGURA 5.38 | Corte com fio diamantado..... | 167 |
| FIGURA 5.39 | Vista da seção transversal..... | 167 |
| FIGURA 5.40 | Curva Granulométrica do Agregado Graúdo Basalto 25 mm..... | 169 |
| FIGURA 5.41 | Curva Granulométrica do Agregado Graúdo Basalto 50 mm..... | 170 |
| FIGURA 5.42 | Curva Granulométrica da areia artificial | 170 |
| FIGURA 6.1 | Variação da Resistência à Compressão com o Tempo dos Corpos-de-Prova Moldados com a Idade..... | 176 |
| FIGURA 6.2 | Variação da Resistência à Tração dos Corpos-de-Prova Moldados com a Idade..... | 177 |
| FIGURA 6.3 | Evolução do Módulo de Elasticidade com o Tempo | 179 |
| FIGURA 6.4 | Variação dos Parâmetros no Tempo em Relação aos Resultados aos 28 dias – Resistências à Compressão e à Tração; e, Módulo de Elasticidade..... | 179 |
| FIGURA 6.5 | Envoltórias de Resistência para as Várias Idades do Maciço de CCR | 185 |
| FIGURA 6.6 | Comparação dos Valores de Esforços Resistentes ao Cisalhamento Obtidos das Correlações nas Várias Idades..... | 187 |
| FIGURA 6.7 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Limpeza com Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 25°C..... | 191 |
| FIGURA 6.8 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Limpeza com Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 45°C..... | 191 |
| FIGURA 6.9 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Apicoamento; e Temperatura da Superfície: 25°C | 192 |
| FIGURA 6.10 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Apicoamento; e Temperatura da Superfície: 45°C | 192 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| FIGURA 6.11 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Limpeza com Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 25°C..... | 193 |
| FIGURA 6.12 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Limpeza com Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 45°C..... | 193 |
| FIGURA 6.13 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Apicoamento; e Temperatura da Superfície: 25°C | 194 |
| FIGURA 6.14 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Apicoamento; e Temperatura da Superfície: 45°C | 194 |
| FIGURA 6.15 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa. Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 25°C | 197 |
| FIGURA 6.16 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa. Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 25°C | 197 |
| FIGURA 6.17 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa. Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 45°C | 198 |
| FIGURA 6.18 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa. Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 45°C | 198 |
| FIGURA 6.19 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa. Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Apicoado; e Temperatura da Superfície: 25°C | 199 |
| FIGURA 6.20 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Apicoado; e Temperatura da Superfície: 25°C | 199 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| FIGURA 6.21 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Apicoado; e Temperatura da Superfície: 45°C | 200 |
| FIGURA 6.22 | Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Apicoado; e Temperatura da Superfície: 45°C | 200 |
| FIGURA 6.23 | Testemunhos do Programa Experimental Complementar I..... | 202 |
| FIGURA 6.24 | Resultados Envoltórias de Resistência – Programa Complementar I..... | 203 |
| FIGURA 6.25 | Envoltória Geral de Resistência – Programa Experimental Complementar I .. | 205 |
| FIGURA 6.26 | Perda de Resistência de Testemunhos Cilíndricos à Compressão para a Situação de Junta do Estudo Experimental Complementar I em Relação ao Maciço entre Camadas..... | 208 |
| FIGURA 6.27 | Corpos-de-Prova obtidos de Testemunhos Prismáticos Juntamente com os seus Correspondentes Cilíndricos | 210 |
| FIGURA 6.28 | Envoltórias de Resistência dos Corpos-de-Prova Gerados por Testemunhos Prismáticos..... | 211 |
| FIGURA 6.29 | Envoltórias de Resistência dos Corpos-de-Prova Gerados por Testemunhos Cilíndricos..... | 211 |
| FIGURA 6.30 | Envoltórias de Resistência dos Corpos-de-Prova Gerados por Corpos-de- Prova Moldados | 212 |
| FIGURA 6.31 | Comparação das Envoltórias de Resistência entre o Programa Complementar II e a Análise de Camadas Sem Argamassa; Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; Temperatura da Superfície: 25°C; e Intervalo de 4hs | 224 |
| FIGURA 6.32 | Comparação das Envoltórias de Resistência entre o Programa Complementar II e a Análise de Camadas Sem Argamassa; Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; Temperatura da Superfície: 25°C; e Intervalo de 8hs | 224 |

FIGURA 6.33 Comparação das Envoltórias de Resistência entre o Programa Complementar II e a Análise de Camadas Com Argamassa; Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; Temperatura da Superfície: 25°C; e Intervalo de 24hs 225

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------------|---|-----|
| TABELA 2.1 | Barragens de CCR em Arco na China | 15 |
| TABELA 2.2 | Evolução dos Consumos de Cimento no Tempo | 25 |
| TABELA 2.3 | Classificação da qualidade do concreto pela porosidade..... | 32 |
| TABELA 2.4 | Comparação do coeficiente de permeabilidade de rochas com pastas maduras | 33 |
| TABELA 2.5 | Recomendação sobre a Porcentagem de Ar Incorporado em Função do Diâmetro Máximo do Agregado | 35 |
| TABELA 2.6 | Fatores de Segurança e Tensões Admissíveis para Barragens de Concreto Massa | 45 |
| TABELA 2.7 | Teores de Aglomerante utilizados em Barragens na Espanha..... | 77 |
| TABELA 2.8 | Dosagem do concreto utilizado na pesquisa de Ribeiro et al., 2003 | 97 |
| TABELA 5.1 | Fatores Controláveis | 150 |
| TABELA 5.2 | Resumo dos Maciços Experimentais – Matriz Experimental..... | 155 |
| TABELA 5.3 | Caracterização de Cimento | 168 |
| TABELA 5.4 | Caracterização dos Agregados..... | 169 |
| TABELA 5.5 | Traço Utilizado para a Confecção dos Maciços Experimentais. | 171 |
| TABELA 5.6 | Traço Utilizado para a Argamassa de Ligação | 172 |
| TABELA 6.1 | Resultados de Ensaios de Compressão, Massa Específica, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Resistência à Tração Direta e Módulo de Elasticidade para Corpos-de-Prova Moldados..... | 175 |
| TABELA 6.2 | Relação entre Resistências à Tração Direta e por Compressão Diametral para Corpos-de-Prova Moldados | 177 |
| TABELA 6.3 | Relação entre Resistência à Tração e Resistência à Compressão para Corpos-de-Prova Moldados | 178 |
| TABELA 6.4 | Medidas do Densímetro Nuclear - Maciços Experimentais em Laboratório.... | 180 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| TABELA 6.5 | Resultados de Ensaios de Resistência à Compressão para Corpos-de-Prova Moldados e Comparação com seus Equivalentes dos Maciços em Laboratório..... | 181 |
| TABELA 6.6 | Resistências à Compressão e à Tração, Massa Específica e Módulo de Elasticidade para Testemunhos..... | 183 |
| TABELA 6.7 | Relação entre Resistências à Tração Direta e por Compressão Diametral para Testemunhos | 184 |
| TABELA 6.8 | Relação entre Resistência à Tração e Resistência à Compressão para Testemunhos | 184 |
| TABELA 6.9 | Valores de Coesão e Ângulo de Atrito para as Várias Idades do Maciço de CCR | 186 |
| TABELA 6.10 | Tensões de Cisalhamento para as Tensões Normais de Ensaio Obtidas das Correlações | 186 |
| TABELA 6.11 | Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto (kPa) | 188 |
| TABELA 6.12 | Parâmetros das Envoltórias de Resistência para a Análise da Envoltória de Resistência entre Camadas com Intervalo de Tempo Inferiores a 12h..... | 190 |
| TABELA 6.13 | Parâmetros das Envoltórias de Resistência para a Análise da Envoltória de Resistência entre Camadas com Intervalos de Tempo Superiores a 8h com Utilização de Argamassa de Ligação..... | 196 |
| TABELA 6.14 | Projeto Experimental Complementar I – Resistência à Compressão, Massa Específica e de Módulo de Elasticidade dos Corpos-de-prova Obtidos de Testemunhos | 201 |
| TABELA 6.15 | Projeto Experimental Complementar I – Resistência à Tração das Juntas dos Corpos-de-prova obtidos de Testemunhos | 202 |
| TABELA 6.16 | Parâmetros das Envoltórias de Resistência para o Programa Experimental Complementar I com Intervalo de Tempo Igual à 4h, sem Utilização de Argamassa de Ligação | 203 |
| TABELA 6.17 | Resultado Geral de Resistência à Compressão, Massa Específica, Resistência à Tração Direta e Módulo de Elasticidade para Testemunhos do Programa Experimental Complementar I | 204 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| TABELA 6.18 | Análise Estatística da Envoltória de Resistência da Junta – Programa Experimental Complementar I..... | 205 |
| TABELA 6.19 | Análise Estatística Segregando Resultados por Tensão Normal de Ensaio..... | 206 |
| TABELA 6.20 | Análise Estatística Segregando Resultados por Tensão Normal de Ensaio..... | 207 |
| TABELA 6.21 | Matriz Experimental – Testemunhos Prismáticos | 209 |
| TABELA 6.22 | Parâmetros das Envoltórias de Resistência para o Programa Experimental Complementar II | 212 |
| TABELA 6.23 | Segregação dos Resultados do Programa Experimental Complementar II por Tensão Normal | 213 |
| TABELA 6.24 | Relação dos Resultados Segregados por Tensão Normal entre os Resultados dos Testemunhos Cilíndricos em Função dos Prismáticos | 214 |
| TABELA 6.25 | Relação dos Resultados Segregados por Tensão Normal entre os Resultados de Intervalo de Tempo de 4 Horas sem Argamassa em Relação aos de 24 Horas com Argamassa | 214 |
| TABELA 6.26 | Comparação dos Resultados de Resistência à Compressão nas Diversas Idades do Programa Experimental com os Dados dos Corpos-de-prova Moldados da Obra..... | 217 |
| TABELA 6.27 | Comparação dos Ensaios de Massa Específica do Programa Experimental com os Dados dos Corpos-de-prova Moldados da Obra | 218 |
| TABELA 6.28 | Comparação dos Ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral para o Maciço fora das Juntas entre Corpos-de-prova Moldados e Testemunhos Cilíndricos..... | 219 |
| TABELA 6.29 | Comparação dos Ensaios de Resistência à Tração Direta para o Maciço fora das Juntas entre Corpos-de-prova Moldados e Testemunhos Cilíndricos | 220 |
| TABELA 6.30 | Comparação dos Ensaios de Módulo de Elasticidade para o Maciço fora das Juntas entre Corpos-de-prova Moldados e Testemunhos Cilíndricos | 221 |
| TABELA 6.31 | Comparação de Resultados de Testemunhos do Programa Experimental para Análise de Camadas com Testemunhos do Protótipo..... | 222 |
| TABELA 6.32 | Comparação de Resultados de Corpos-de-Prova Moldados do Programa Experimental para Análise de Camadas com os equivalentes do Protótipo | 223 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| TABELA 6.33 | Resultados de Envoltória de Resistência - Obras Citadas em HESS, 1999..... | 225 |
| TABELA 6.34 | Comparação dos Resultados Obras Citadas por HESS, 1999, com relação à Aplicação de Misturas de Ligação..... | 226 |
| TABELA 6.35 | Resultados de Módulo de Elasticidade comparados com NBR 6118..... | 227 |
| TABELA 6.36 | Comparação dos Resultados do Programa Experimental Complementar II por Tensão Normal com o Maciço Fora da Junta (Matriz de CCR)..... | 229 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|------------------|--|
| A | Consumo de água |
| a/c | Relação água/cimento, em massa |
| A _b | Área da face do corpo-de-prova do ensaio de permeabilidade do concreto |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACI | American Concrete Institute |
| Apic. | Apicoamento do topo da camada da interface estudada |
| Ar Compr. | Limpeza com Ar Comprimido de baixa pressão da interface estudada |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| ATF | CCR com Alto Teor de Finos |
| c | coesão |
| C | Consumo de cimento |
| c/ | Com aplicação de argamassa de ligação |
| C ₃ A | Aluminato Tricálcico |
| C ₃ S | Silicato Tricálcico |
| CBDB | Comitê Brasileiro de Barragens |
| CBDB-NRSP | Núcleo Regional de São Paulo do Comitê Brasileiro de Barragens |
| CBGB | Comitê Brasileiro de Grandes Barragens |
| CCC | Condição de Carregamento de Construção |
| CCE | Condição de Carregamento Excepcional |
| CCL | Condição de Carregamento Limite |
| CCN | Condição de Carregamento Normal |
| CCR | Concreto Compactado com Rolo |
| CEMIG | Companhia Energética de Minas Gerais S. A. |

| | |
|-------------------|---|
| CIGB | Commission Internationale des Grands Barrages |
| CODEVASF | Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e do Parnaíba |
| COPEL | Companhia Paranaense de Energia S. A. |
| CORSAN | Companhia Riograndense de Saneamento |
| CPU | Unidade Central de Processamento de microcomputadores PC compatíveis |
| CRIEPI | <i>Central Research Institute of Electric Power Industry</i> |
| <i>d</i> | Lado direito da camada, colocado ao lado da numeração das camadas (ex. 10d) |
| <i>d</i> | Tamanho da malha da peneira da série normal |
| <i>D</i> | Diâmetro do corpo-de-prova |
| DFESA | Dona Francisca Energética S. A. |
| DMA | Dispositivo para Determinação da Massa Unitária e da Água Unitária |
| $D_{m\acute{a}x}$ | Dimensão Máxima Característica do Agregado |
| <i>e:</i> | Lado esquerdo da camada, colocado ao lado da numeração das camadas (ex. 8e) |
| E_c | Módulo de Elasticidade do concreto |
| ELETROBRÁS | Centrais Elétricas Brasileiras S.A. |
| <i>F</i> | Consumo de cinza volante |
| f_{ck} | Resistência característica à compressão do concreto |
| f_t | Resultado de resistência à tração no ensaio de compressão axial |
| FSD | Fator de Segurança ao Deslizamento |
| FSD_{ϕ} | Fator de minoração da resistência devida ao atrito |
| FSD_c | Fator de minoração da resistência devida à coesão |
| FSF | Fator de Segurança à Flutuação |
| FST | Fator de Segurança ao Tombamento |

| | |
|----------------------|--|
| FURNAS | Furnas Centrais Elétricas S. A. |
| <u>H</u> | Altura da coluna de água correspondente à pressão aplicada no ensaio de permeabilidade do concreto |
| H | Tensão Tangencial na seção ensaiada no ensaio de cisalhamento direto |
| I, II, III e IV | Camadas de Concretagem, na seqüência de execução |
| I/II, II/III, III/IV | Juntas entre camadas sucessivas |
| IBRACON | Instituto Brasileiro do Concreto |
| ICOLD | International Commission on Large Dams |
| Id.c. | Idade de controle para efeito de ruptura de corpos-de-prova |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| k | Coefficiente de permeabilidade |
| K_a | Coefficiente de Restrição devido à fundação considerada infinitamente rígida |
| k_r | Coefficiente de minoração de K_r , levando em conta a deformabilidade do concreto e da fundação |
| L | Altura do corpo-de-prova |
| LACTEC | Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento |
| LAME | Laboratório de Materiais e Estruturas |
| M.F. | Módulo de Finura |
| MgO | Óxido de Magnésio |
| n | Número de peneiras da série normal a partir da que define $D_{máx}$ |
| N | Resultante da força normal |
| NBR | Norma Brasileira |
| p | Porcentagem retida acumulada na peneira de malha d |
| P | Esforço total aplicado pela prensa no ensaio de resistência à tração por compressão diametral |

| | |
|----------------------|--|
| PC | Computador pessoal baseado em microprocessador (INTEL ou similar) |
| PVC | Cloreto de Polivinila |
| Q | Vazão de entrada para o ensaio de permeabilidade do concreto |
| R^2 | Quadrado do Coeficiente de Correlação do Momento do Produto de Pearson |
| RCC | <i>Roller compacted concrete</i> |
| RCD | <i>Roller Compacted Dam</i> |
| RILEM | <i>International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures</i> |
| s/ | Sem aplicação de argamassa de ligação |
| SO ₃ | Trióxido de enxofre |
| T | Resultante da força de Cisalhamento |
| UFPR | Universidade Federal do Paraná |
| UHE | Usina hidrelétrica |
| USBR | United States Department of the Interior Bureau of Reclamation |
| V | Tensão Normal na seção ensaiada no ensaio de cisalhamento direto |
| α | Coeficiente de dilatação térmica do concreto |
| $\underline{\alpha}$ | Razão da graduação geométrica de agregados |
| Δt | Intervalo de tempo entre camadas de concretagem sucessivas |
| $\Delta\theta$ | Diferença de temperatura |
| ε | Deformação do Concreto |
| μ | Subpressão |
| σ | Tensão Normal no Concreto |
| σ_e | Tensão normal efetiva |
| σ_t | Tensão normal total |
| τ | Tensão Tangencial |

| | |
|------------|--|
| Ψ | Coeficiente de Fluência do concreto |
| ϕ | Ângulo de atrito |
| ρ | Peso específico da água |
| β | Porcentagem que passa na peneira correspondente a $D_{m\acute{a}x}$ e retida na peneira imediatamente inferior |
| ρ | Pressão aplicada no ensaio de permeabilidade do concreto |
| $\sum M_e$ | Somatório de todos os momentos estabilizantes em relação ao ponto considerado |
| $\sum M_t$ | Somatório de todos os momentos de tombamento |
| $\sum U$ | Somatório de todos os esforços verticais gerados pela subpressão em uma seção estudada |
| $\sum V$ | Somatório de todas as forças gravitacionais geradas pelo peso próprio e as cargas permanentes mínimas da estrutura |

MACIÇOS EXPERIMENTAIS DE LABORATÓRIO DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO APLICADO ÀS BARRAGENS

José Marques Filho

RESUMO

O crescimento das populações humanas e a necessidade urgente de melhoria das suas condições de vida, através do desenvolvimento sustentável, pressionam as reservas disponíveis para consumo, agronegócio e geração de energia. A utilização planejada dos recursos hídricos induz a formação de reservatórios através de aproveitamentos hidráulicos. A construção de barragens de concreto se iniciou no final do século XIX, e no Brasil teve notável desenvolvimento entre os anos 60 e 80, quando as barragens de concreto massa perderam competitividade em relação a diversas alternativas. O processo executivo denominado Concreto Compactado com Rolo, ou CCR, é uma evolução natural do concreto convencional, utilizando intensamente equipamentos originariamente empregados em grandes obras de terra para transporte, espalhamento e adensamento do concreto, gerando um processo industrial eficiente e competitivo.

No Brasil a técnica está se mostrando competitiva em vários arranjos hidráulicos, notadamente a partir da década de 90, sendo desenvolvido o conceito de CCR com alto teor de finos pela pequena disponibilidade de pozolana no país. Pelas características intrínsecas do processo executivo, com consistência mais seca que o concreto convencional e o adensamento obtido pela aplicação de rolos compactadores, surgiram dúvidas quanto à aplicabilidade e capacidade de fornecimento de parâmetros adequados dos ensaios usualmente utilizados na caracterização e controle de qualidade de concreto convencional. Esta lacuna de conhecimento foi abordada na construção de maciços experimentais no campo, cujos resultados são conhecidos e interpretados, em geral, após o início da obra.

Este trabalho propôs a execução de maciços experimentais compactados em laboratório, através de equipamento para simulação de colocação e adensamento de CCR existente no Laboratório de Concreto de FURNAS Centrais Elétricas S. A., em Goiânia. Os resultados foram validados através da comparação com os resultados do controle de qualidade do campo e testemunhos da UHE Dona Francisca, no Rio Grande do Sul.

Com a validação da simulação em laboratório foram estudadas envoltórias de resistência entre camadas de concretagem para várias situações de intervalo de tempo de lançamento e de preparo e exposição de superfície de camada. Os estudos foram efetuados através de ensaios de cisalhamento direto em corpos-de-prova e testemunhos, avaliando os efeitos do traumatismo causado pela extração e pela sua usinagem, e os efeitos de sua forma propondo ensaios em testemunhos prismáticos, comparando-os com resultados equivalentes do maciço fora da junta.

Os maciços experimentais de laboratório permitem a realização de ensaios de difícil execução no campo, e permitem a otimização de misturas antes do início da obra, com parametrização confiável.

EXPERIMENTAL TEST FILLS IN LABORATORY OF ROLLED COMPACTED CONCRETE (RCC) APPLIED TO DAMS' CONSTRUCTION

José Marques Filho

SUMMARY

The increase of human populations and the urgent need for improvements of their living conditions, by means of sustainable development, have put pressure on the water reserves, available for consumption, agribusiness and electric power generation. The planned utilization of hydro resources leads to the forming of reservoirs throughout the hydro projects. The construction of concrete dams has started at the end of the 19th century and, in Brazil, there has been an impressive development during the periods of 60's and 70's, when the mass concrete dams have lost the competitiveness, as compared to other several alternatives. The executive process denominated Rolled Compacted Concrete (RCC) is considered as a natural evolution of the conventional concrete, utilizing, intensively, earth-moving for transport, placement and compaction of concrete, thus generating an efficient and competitive industrial process.

In Brazil, the RCC has been demonstrated to be competitive in several hydraulic arrangements, especially as of the decade of 90's, when the RCC concept has been developed using the high fine contents approach, due to the small availability of Fly Ash in the country. Due to the intrinsic characteristics of the executive process, having dry consistency, as compared to the conventional concrete, and the compaction obtained from the application of compacting rollers, doubts came up as per the applicability and the capability of obtaining adequate parameters of the tests usually performed in the characterization and quality control of the conventional concrete. This gap of knowledge has been addressed during the construction of site full scale trials, whose results are known and interpreted, normally, after the commencement of construction works.

The present work has proposed the execution of experimental test fills, in laboratory, by means of equipment for simulation of placement and compaction of RCC that exist in the Concrete Laboratory of FURNAS Centrais Elétricas S/A, in the city of Goiania, Brazil. The results have been validated throughout its comparison with those of the field quality control and cores drilled from Dona Francisca Hydroelectric Power Plant, in the State of Rio Grande do Sul.

Based on the laboratory simulation validation, studies were made to determine the rupture envelope for the surface between concrete layers, for several situations of time intervals for casting, preparation and exposition of the layer's surface. Such studies were performed by means of direct shear tests in cores and molded samples, evaluating the effects of traumatism caused by the extraction, as well as the effects of its shape, proposing tests in prismatic cores, and comparing the results with the equivalent drilled ones.

The laboratory experimental test fills allow for the realization of tests that are difficult to be executed in field and also allow for the optimization of mixtures prior the job construction, at a reliable parametering.

1 INTRODUÇÃO

O CCR – Concreto Compactado com Rolo é uma técnica construtiva, com peculiaridade de uso intensivo de equipamentos tipicamente empregados em obras de terra/enrocamento, utilizando um material conhecido que é o concreto, procurando obter um máximo desempenho no quesito velocidade de lançamento, aliado a custos baixos e teores de cimento relativamente pequenos para diminuição dos efeitos das variações volumétricas de origem termogênica do concreto, nas obras de concreto massa. A técnica utiliza maciçamente equipamentos para colocação e compactação do concreto, diminuindo a parcela de mão-de-obra por unidade de volume quando comparado com obras de concreto convencional, gerando um processo industrial muito eficiente, com atividades repetitivas mensuráveis. Sua aplicação deve ser sempre analisada holisticamente ao longo de todas as fases de implantação de um empreendimento, desde a detecção da necessidade da sociedade até o final de sua vida útil. O processo executivo impacta em todas as etapas construtivas, pois seus paradigmas de execução e controle são particulares e totalmente diferentes da prática usual dos concretos convencionais, bem como pode trazer aspectos a serem avaliados e monitorados ao longo da vida útil da obra.

Apesar da quantidade significativa de reservatórios hoje existentes, o estudo desta técnica e de seu material resultante se justifica pela demanda de empreendimentos hidráulicos gerada pelo crescimento das populações humanas e pela necessidade inerente de melhoria das suas condições de vida, que pressionam as reservas de água para consumo humano, agropecuário e industrial; bem como pelo aumento da procura por energia para promoção do desenvolvimento econômico auto-sustentado e da distribuição de riqueza. Este fato leva a utilização planejada dos recursos hídricos, de modo a satisfazer as necessidades mencionadas, mantendo-se sempre a ótica do respeito ao meio ambiente. A necessidade atual de fornecimento contínuo destes bens não é, em geral, compatível com os regimes pluviométricos existentes, levando ao conceito de armazenagem de água para consumo, amortização de cheias e geração de energia elétrica, através de reservatórios gerados por barragens nos cursos naturais dos rios. As soluções em concreto compactado com rolo são atrativas nestes empreendimentos, pela rapidez de sua execução, pelos custos relativamente módicos e por sua adaptabilidade a várias situações geológico-geotécnicas e hidrometeorológicas. Sua rapidez e flexibilidade executivas, também o tornam uma opção interessante para reformas e reparos de obras hidráulicas existentes.

As principais soluções de barramentos a serem utilizadas nos arranjos hidráulicos podem ser divididas em barragens com corpo executado em materiais soltos ou em concreto, sendo que

a solução final depende de avaliação técnico-econômico-ambiental considerando o empreendimento como um todo. A escolha de um tipo de barragem em um aproveitamento hidráulico depende, obviamente, de condicionantes de custo, prazo e qualidade técnica, sendo que esta última depende da tecnologia existente, através da evolução da teoria da segurança, dos modelos estruturais e dos processos construtivos (SHARMA, 1981; CREAGER et al., 1965; GRISHIN, 1981; VARLET, 1972; FUSCO, 1976). Estes fatores se materializam na evolução das normas e códigos existentes, utilizando os dados obtidos de protótipos em operação, os avanços na área de modelos estruturais e dos estudos da interação estrutura/fundação (ELETROBRÁS e CBDB, 2003; CDDB, 1999; MASON, 1988). Completam os parâmetros para decisão as condições climáticas e hidrológicas, as condicionantes geológicas-geotécnicas, a topografia do local e a disponibilidade de materiais para a execução. (SHARMA, 1981; CREAGER et al., 1965; GRISHIN, 1981; VARLET, 1972)

Obviamente, a escolha de uma solução não comparará as soluções do barramento em si, mas sim todo o arranjo espacial do aproveitamento considerado, bem como a redução dos riscos geológicos e hidrológicos envolvidos na construção. Os arranjos físicos dos aproveitamentos hidráulicos contendo barragens de concreto podem permitir a incorporação de vertedouros, tomadas d'água e outras estruturas, fato que pode diminuir os volumes de escavação e de concreto destas estruturas. Apesar de comparativamente uma barragem de concreto ter um custo mais elevado que uma solução em material solto, o arranjo final pode apresentar custos mais baixos devido a possível otimização do arranjo físico do empreendimento.

As barragens de concreto adotam cinco tipos de soluções básicas: barragens de concreto a gravidade, a gravidade aliviada, arco-gravidade, em arco e em contrafortes. Nas barragens de concreto a gravidade, grosseiramente, as ações geradas pelo reservatório têm como fator estabilizante o peso próprio da estrutura, utilizando como critério de resistência envoltórias de Mohr-Coulomb em modelos cujo comportamento predominante pode ser caracterizado grosseiramente pela seção transversal em balanço. As barragens em arco são compostas por estruturas curvadas em que os carregamentos são transferidos por efeito arco ao perímetro, ao invés de, principalmente, na vertical como no modelo a gravidade. As barragens de arco-gravidade apresentam um comportamento intermediário às duas anteriormente mencionadas. Nas barragens a gravidade aliviada, são projetados vazios nas regiões menos solicitadas na interface entre blocos, diminuindo a subpressão e criando superfícies laterais para a dissipação do calor termogênico da hidratação do cimento. As barragens a contrafortes consideram a utilização de placa a montante da barragem apoiada em contrafortes de concreto. As duas últimas soluções

têm uma utilização obrigatória de formas laterais que aumentam a complexidade da obra em termos de logística e trabalho com mão-de-obra refinada. Em todas estas soluções estão associados volumes expressivos de concreto, gerando preocupações quanto a fissuração gerada pelos fenômenos termogênicos da hidratação do cimento, cujos malefícios são potencializados na presença da água do reservatório. Na evolução do concreto para utilização em estruturas de grande porte surgiu o conceito de concreto massa, que exige medidas para controlar a geração de calor e a variação de volume decorrente, a fim de minimizar a sua fissuração (CBGB et al., 1989; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997).

No dimensionamento, em barragens de concreto as juntas entre camadas de lançamento sucessivas são as partes mais críticas em relação à resistência mecânica e à permeabilidade pelo maciço de concreto (SHARMA, 1981; CREAGER et al., 1965; GRISHIM, 1983; SCHREIBER, 1981; e, VARLET, 1972), fato levado em conta nos diversos critérios de projeto onde os coeficientes de minoração da coesão são muito superiores àqueles recomendados para o ângulo de atrito, sempre considerando a envoltória de Mohr-Coulomb.

Apesar do sucesso das barragens de concreto, com obras de grande impacto no Brasil como Itaipu, Água Vermelha e Funil, sua utilização decaiu após a década de 70, sendo seus arranjos menos atrativos que outras soluções utilizando materiais soltos. Alternativas de barragem de enrocamento com face de concreto se mostraram cada vez mais competitivas em relação àquelas com concreto (CBGB, 1999; CBGB et al., 1989).

A utilização da técnica do concreto compactado com rolo na execução de barragens de concreto traz como características a grande velocidade de execução, a diminuição do consumo de trabalho humano por volume unitário e a diminuição do consumo de aglomerante. A colocação e compactação contínuas possibilitam uma diminuição considerável da quantidade necessária de formas, simplificando a execução e reduzindo mais os custos. As vantagens da utilização de CCR em relação às soluções equivalentes em concreto convencional permitiram uma retomada das soluções utilizando maciços de concreto em obras hidráulicas, notadamente a partir dos anos 80 (CBGB, 1999; ICOLD, 2005; CHONGGANG e DUNSTAN, 1991; e, DUNSTAN, 2003; ICOLD, 1997).

Em um empreendimento hidráulico, qualquer que seja a solução de barragem adotada, são fundamentais a parametrização do material para efeito de projeto, a confiabilidade dos processos de dosagem do concreto e a indicação de valores para o controle da qualidade da obra e sua análise. Todos estes fatores devem estar subsidiados por correlações laboratório/obra sedimentadas e confiáveis. A presente pesquisa constitui-se de estudo da utilização de maciços

experimentais em laboratório para a previsão dos parâmetros físicos de concreto compactado com rolo, criando procedimento para otimização de dosagem e simulação das condições do campo. Os maciços experimentais foram executados no equipamento para compactação de CCR em laboratório existente no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A., em Goiânia, estado de Goiás.

Desde o início do desenvolvimento do concreto compactado com rolo os engenheiros apresentaram várias dúvidas sobre o comportamento desse material, geradas por sua consistência mais seca do que os concretos convencionais, sob o ponto de vista de projeto, execução e desempenho das obras. As resistências iniciais ao emprego do CCR se originaram na dúvida não procedente sobre este se tratar realmente de concreto ou de um enrocamento enriquecido, e estenderam-se à desconfiança de sua estabilidade no decorrer do tempo sob a ação da água. Além destes fatores, a consistência mais seca que a de concretos convencionais utilizados na construção de barragens gerou maiores desconfianças com relação aos parâmetros de resistência e permeabilidade em obras de CCR (BACARA, 1997; DIÉZ-CASCÓN, 1995; KOGAN e FEODOSSOV, 1995; RIBEIRO, 1998; RIBEIRO et al., 2002; e, RIBEIRO e CORRAJOLA, 2003). As principais dúvidas surgidas durante o desenvolvimento de barragens de CCR são apresentadas a seguir:

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

Este trabalho procurará, dentro dos limites da pesquisa, analisar os conceitos e condicionantes envolvidos nestas questões através programa de pesquisa onde é prevista a execução de maciços experimentais em laboratório cujos resultados serão comparados com àqueles obtidos durante a execução da barragem de CCR da Usina Hidrelétrica Dona Francisca, no Rio Grande do Sul. Esta pesquisa será complementada e confrontada com as soluções adotadas em obras já executadas ou em execução, através das referências bibliográficas disponíveis, e, em visitas a obras e laboratórios.

1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

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

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

Com a característica de diminuir consideravelmente o tempo de execução de obra, com a utilização de equipamentos com grande disponibilidade no mercado mundial de engenharia civil, o CCR promoveu o retorno das soluções em concreto para os barramentos hidráulicos. Utilizado inicialmente de maneira tímida, pela desconfiança da ligação entre camadas ou pela imagem de um possível caminho de percolação entre as mesmas, o CCR foi tomando vulto no cenário técnico nacional, sendo utilizado em aproveitamentos de porte expressivo.

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

Como a trabalhabilidade e volume de produção dependem da obtenção de um material mais seco que os concretos convencionais que permita a utilização de rolo vibratório com eficiência, têm-se consumos de água muito baixos, e como consequência, seu controle em todas as fases do processo acaba determinando a qualidade final da obra. Este controle é prejudicado pela grande variabilidade de condições climáticas, tanto sazonais quanto ao longo do dia, notadamente nas regiões sul e sudeste do Brasil.

Além dos estudos da influência da variação dos consumos de água se aliam as dificuldades de parametrização das envoltórias de resistência entre camadas, as soluções de impermeabilização da face de montante, o controle da central de concreto no tempo, os fenômenos térmicos, a fluência e a obtenção de dados adequados de projeto.

As resistências ao cisalhamento entre camadas de CCR e entre o concreto e a rocha da fundação são parâmetros determinantes do dimensionamento e da segurança da estrutura. O crescimento da adoção de barragens de CCR e o natural aumento das alturas das barragens que postulem a utilização desta técnica elevam a responsabilidade estrutural requerida do material, exigindo avaliações mais precisas de sua envoltória de resistência.

As dificuldades de obtenção de parâmetros de projeto e de tomada de decisão construtiva são geradas pela grande influência da forma do agregado, da superfície específica do filer obtido, do cimento e suas adições, as quais são locais, dependendo da petrografia das rochas existentes e dos demais materiais disponíveis. Também são muito importantes os tipos de equipamentos de compactação disponíveis, o treinamento da mão-de-obra e o desenvolvimento de sistema de garantia da qualidade adequado.

A multiplicidade de variáveis mostra a complexidade do processo de análise do problema, que possui características particulares para cada obra estudada. Estes fatores têm sua influência analisada durante os ensaios laboratoriais para determinação da dosagem, e durante a execução de maciços experimentais no campo que permitam o ajuste de traços e da central de concreto, bem como definem os parâmetros necessários ao término do projeto. Este último

processo ocorre juntamente com a execução do protótipo trazendo vários problemas logísticos e de acerto do cronograma de obra e projeto.

Como a obtenção de resultados de ensaios demanda um intervalo de tempo considerável, nesta seqüência de atividades, a otimização da dosagem só ocorre, em geral, após o lançamento de quantidade considerável de CCR. A obtenção de dados prévios em laboratório permitiria otimizar o processo como um todo, fornecendo subsídios para o dimensionamento do canteiro e traria um benefício econômico fundamental no início da obra.

O trabalho proposto pretende fornecer ferramentas que permitam obter correlações baseadas na variação dos principais fatores que interferem no processo, diminuindo o grau de incerteza quanto às principais características do CCR. Procurar-se-á, também, propor diretrizes para a utilização de pistas experimentais em laboratório que trariam, como exposto, grande vantagem para a comunidade técnica e para a sociedade como um todo.

1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar as propriedades do CCR - Concreto Compactado com Rolo nos estados fresco e endurecido utilizando resultados de maciços experimentais executados em laboratório, comparando-os com os resultados da barragem da UHE dona Francisca, construída no Rio Grande do Sul.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Calibrar os maciços experimentais através da simulação de diversas condições de campo e da comparação de seus resultados com aqueles obtidos em protótipo.
- Obter correlações dos parâmetros de caracterização física do material, variando-se a simulação das condições ambientais, a cura, o tempo de execução e a presença de argamassa de ligação entre camadas. Os parâmetros eleitos estão abaixo nominados:
 - Trabalhabilidade, através do *Cannon Time*.
 - Resistência aos esforços mecânicos, através da resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração direta, coesão e ângulo de atrito.

- Permeabilidade do concreto fresco e do concreto endurecido.
- Módulo de elasticidade.
- Dotar a obra de critérios claros para utilização da argamassa de ligação, notadamente no quesito necessidade de argamassa em função do intervalo de lançamento entre camadas.
- Estudar os parâmetros de resistência mecânica na interface entre camadas de lançamento sucessivas, admitindo que valha a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb, representadas pela coesão e ângulo de atrito. Também serão avaliadas a resistência a tração direta e a resistência à tração por compressão diametral.
- Estabelecer parâmetros e diretrizes para utilização das pistas experimentais em laboratório em projetos envolvendo CCR.
- Oferecer análise crítica ao meio nacional da influência de cada fator interveniente no processo, através dos resultados de pista experimental em laboratório.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado, assim, nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1 – INTRODUÇÃO
- Capítulo 2 – BARRAGENS DE CCR– Revisa temas referentes as barragens de concreto, da evolução dos conceitos do concreto massa para o CCR, as técnicas atualmente utilizadas na execução de CCR, as evoluções em andamento, os maciços experimentais no campo e no laboratório, e as tendências de futuro para o desenvolvimento do material.
- Capítulo 3 – ENSAIOS ESPECÍFICOS E ESPECIAIS PARA BARRAGENS DE CCR – Apresenta os ensaios específicos ou que sofreram adaptações devidas às características diferenciadas de consistência, trabalhabilidade, processo de adensamento e sistema executivo do CCR.
- Capítulo 4 –DOSAGEM DE CCR COM ALTO TEOR DE FINOS – Apresenta os processos para o desenvolvimento das dosagens baseados no estado da arte atual da técnica do CCR, mostrando a evolução dos conceitos empregados em concreto massa até o

CCR, procurando manter uma visão holística do processo integrando projeto, obra e desempenho.

- Capítulo 5 – PROGRAMA EXPERIMENTAL - Apresenta as técnicas e os ensaios empregados na caracterização do CCR, bem como a matriz experimental utilizada com a variação dos fatores variáveis do processo.
- Capítulo 6 – ANÁLISE DE RESULTADOS – Apresenta os resultados dos ensaios realizados, segregados por tratamento e com ênfase nos estudos para a determinação das envoltórias de resistência entre camadas de concretagem do CCR.
- Capítulo 7 – CONCLUSÕES – Apresenta um resumo dos principais resultados obtidos e de suas conseqüência nas atividades de projeto e construção, procurando estabelecer rotina para a abordagem de barragem de CCR, bem como são propostas continuções desta pesquisa.

2 BARRAGENS DE CCR

As barragens de CCR têm características gerais de projeto e comportamento estrutural muito similar aos modelos usualmente adotados para concreto convencional, que são largamente conhecidos e estudados, tendo como base vários protótipos em funcionamento. Durante o desenvolvimento deste item, serão mostrados as características do material e os processos executivos envolvidos, bem como feita uma discussão da adaptação à solução utilizando CCR.

2.1 HISTÓRICO E APLICAÇÕES

2.1.1 Histórico da utilização de Barragens de Concreto

A utilização de concreto em barragens data da segunda metade do século XIX, inicialmente sem cuidados especiais quanto ao controle da qualidade do material, utilizando métodos empíricos baseados em estruturas semelhantes de alvenaria. Marco especial no desenvolvimento da técnica foi a barragem de Crystal Springs, com 46,2 m de altura na Califórnia, em 1888, onde houve registros de controle tecnológico do concreto, especificando-se o tamanho dos blocos de concretagem e limitando a relação água/cimento (CBGB et al., 1989). A tecnologia de concreto sofreu grandes evoluções nas três primeiras décadas do século XX, desenvolvendo-se os processos executivos e sedimentando-se a maioria dos conceitos envolvidos.

A evolução do emprego do concreto em obras de grande porte levou ao conceito de concreto massa, definido como aquele concreto lançado em grandes volumes e que requeira meios especiais para combate à geração de calor e às variações volumétricas deste tipo de material (MEHTA e MONTEIRO, 1994). As soluções em concreto convencional apresentam métodos construtivos similares ao de obras de pequeno porte no que se refere à necessidade de adensamento do concreto com vibradores e, para tal, utilizam método de lançamento de porções discretas de material e utilização intensiva de mão-de-obra. O concreto deve ter consistência adequada ao processo de colocação e adensamento, com grande quantidade de pasta, devendo as dosagens se preocupar com a minimização da quantidade de aglomerante, para tentar coibir, juntamente com outras medidas, os efeitos térmicos e procurar soluções mais viáveis economicamente. Desenvolveu-se também a utilização de materiais cimentícios, principalmente as pozolanas que têm capacidade de reação com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação

do cimento, que além de diminuir o consumo de cimento, e, portanto os efeitos da geração de calor, diminuem a porosidade do maciço e neutralizam a reação álcali-agregado. Dentre os materiais cimentícios são particularmente importantes as cinzas volantes (resultado da queima de carvão mineral em usinas termelétricas), as pozolanas naturais, as pozolanas artificiais obtidas da calcinação de argilas (com aplicações de sucesso no Brasil (CDGB et al., 1989)), escória de alto-forno moída, a sílica ativa e o agregado pulverizado. Este último tendo sua utilização mencionada pela primeira vez por Osipov, que se baseou em ensaios executados na Rússia e em Itaipu no Brasil (ALMEIDA, 1991; e PACELLI DE ANDRADE, 1996). No Brasil, a utilização de agregado pulverizado teve como marco importante os ensaios pioneiros desenvolvidos na Usina Hidrelétrica Segredo da COPEL, localizada no estado do Paraná, por Paulon et al. (1992).

A grande incidência no uso de trabalho humano e as restrições à velocidade de colocação reduziram, ao longo do tempo, a competitividade deste tipo de solução. Após a segunda guerra mundial, a indústria de equipamentos pesados tornou viável a utilização dos equipamentos de terraplenagem e o desenvolvimento intenso das barragens de materiais soltos. Surgiu como evolução natural no processo a idéia de se otimizar o processo executivo das barragens de concreto com equipamentos semelhantes aos das obras de terra, utilizando-se um concreto com consistência que suportasse o tráfego de equipamentos de transporte, espalhamento e compactação. A técnica do concreto compactado com rolo gerou um renascimento das barragens de concreto, em um momento onde sua competitividade havia decrescido em termos de mundo, principalmente a partir da década de 80 (ICOLD, 2005).

2.1.2 Evolução Histórica da Técnica do CCR Aplicado às Barragens

A aplicação do CCR iniciou-se em pavimentos e em concretos de regularização, com uso contínuo desde a década de 20, principalmente como base de pavimentos e pistas aeroportuárias. A técnica teve a denominação usual de mistura pobre (*lean mix*), concreto seco pobre e outras denominações que evocavam a idéia de material grosseiro para aplicações secundárias, com características mecânicas sofríveis.

A primeira menção sobre a possibilidade de utilização das técnicas comuns a obras de terra para execução de barragens de concreto foi feita por HADLEY, 1941. Este trabalho pioneiro esperou por 20 anos as primeiras aplicações em barragens. Duas obras no início da década de 60 iniciaram os conceitos da técnica do CCR em barragens. A primazia de utilização

de técnica de compactação pode ser creditada à ensecadeira da Barragem de Shimen, em Taipei no início dos anos 60, que utilizou concreto como seu núcleo impermeável (LOWE, 1962). Deve ser mencionada, também, a Barragem de Alpe Gera, construída entre 1961 e 1964 na Itália, que utilizou o conceito de praça estendida, onde as camadas de 70 cm de espessura eram colocadas em toda a seção horizontal da barragem e as juntas de contração cortadas posteriormente à compactação executada por bancada de vibradores colocadas em tratores (GENTILE, 1964 e 1970). Estas aplicações iniciais diferem muito da técnica desenvolvida para o CCR, mas têm o mérito de criar condições para a discussão e o emprego posterior em larga escala do processo construtivo.

Na seqüência de eventos que levaram ao desenvolvimento do CCR, três publicações foram fundamentais. RAPHAEL (1970) propôs um trabalho teórico sobre a otimização de barragens de concreto a gravidade, tratando-o ainda como um material grosseiro. No início desta década são importantes também os dois trabalhos de MOFFAT (1973) sobre o desenvolvimento de CCR aplicado a barragens de concreto; e os trabalhos de CANNON (1972 e 1974) sobre os resultados de testes de compactação desenvolvidos na barragem de Tims Ford, nos Estados Unidos. Nos anos 70, vários ensaios em laboratório para exploração da técnica de compactação de concreto e sobre os estudos de concreto pobre, com substituição extensiva de cimento por pozolana foram realizados, desenvolvendo processos de preenchimento de vazios e aumento da compacidade (MOFFAT, 1973; CANNON, 1974; SHRADER, 1977; TYNES, 1973; DUNSTAN, 1978).

A primeira proposta de aplicação da técnica do CCR foi efetuada pelo U.S. Army Corps of Engineers em alternativa de projeto de Zintel Dam em 1974 (SIVLEY, 1976), cuja construção foi postergada, só ocorrendo em 1992.

A primeira grande aplicação do CCR com volumes elevados ocorreu na Barragem de Tarbela, no Paquistão em 1975, onde o CCR foi utilizado como reposição de alinhamento em seções rompidas de túneis, ainda como material grosseiro de enchimento, e, também, foi utilizado na ensecadeira com maior rigor no controle da qualidade, mas ainda longe das necessidades de uma obra de concreto (JOHNSON, 1979; MARSHALL, 1975). Em seqüência, baseadas nos vários estudos da década anterior, foram construídas várias barragens de CCR de pequeno porte com sucesso no Reino Unido em 1982 (IFFLA et al., 1992).

A primeira obra de grande porte de CCR foi construída nos Estados Unidos da América, a barragem de Willow Creek, em 1982, com 52 m de altura e um volume colocado de CCR de 317.000 m³. O projeto previu baixo consumo de material cimentício, e utilização de placas pré-

moldadas de concreto para garantia da estanqueidade da face de montante da barragem. Este projeto teve como parte de seu propósito a avaliação do desempenho da técnica construtiva, não havendo grandes cuidados quanto possíveis fissurações e estudos de juntas de contração, surgindo, durante a operação, vazamentos excessivos que foram sendo corrigidos com injeções de calda de cimento (SCHRADER, 1981 e 1982; SCHRADER e THAYER, 1982; SCHRADER e MCKINNON, 1984; HOLANDA, 1983; MATSUMURA et al., 1985; MCDOWELL, 1985). Apesar dos inconvenientes vazamentos apresentados, a técnica mostrou-se eficaz e rápida, abrindo o caminho para o uso extensivo da técnica construtiva.

Com o passar do tempo, seguindo o princípio do fechamento dos vazios do CCR, foi sendo desenvolvido o conceito de alto conteúdo de material cimentício da massa, principalmente com alto teor de pozolana; e, a partir do meio da década de 80, foram construídas as barragens de Castilblanco de los Arroyos, na Espanha (BAYAN, 1988) e Kengkou, na China (WANG, 1988).

Nos Estados Unidos, na década de 80, surgiram dois marcos importantes na construção de barragens de concreto massa com concreto compactado com rolo. A primeira foi a Barragem de Upper Stillwater, com um volume colocado de 1.281.000 m³ de concreto, utilizando alto teor de material cimentício, 252 kg/m³, compostos por 78 kgf/m³ de cimento e o restante de cinza volante (CROW et al., 1984; DUNSTAN, 1981; KARL, 1985; MCTAVISH, 1988). Esta barragem não previu juntas de construção, e sofreu fissuração severa com conseqüente vazamento expressivo (DOLEN et al., 1988; OLIVERSON e RICHARDSON, 1984). Apesar deste problema, obteve-se um concreto com excelentes propriedades mecânicas e baixa permeabilidade (RICHARDSON, 1988; CROW et al., 1984; RICHARDSON, 1991; RICHARDSON, 1992). A segunda barragem de expressão foi Elk Creek, com construção iniciada em 1986 e paralisada por questões ambientais em 1987, cujo projeto previu altura de camada de 60 cm e, 4 subcamadas compactadas e aplicação de mistura de ligação entre camadas (HOPMAN e CHAMBERS, 1988; TUCKER, 1984; HOPMAN, 1992; IWPDC, 1988).

Com o desenvolvimento da técnica e com os resultados obtidos pelas várias obras desenvolvidas, as barragens a gravidade executadas em CCR foram adotadas em obras de responsabilidade crescente, destacando-se as barragens de Salto Caxias, no Brasil, com um vertedouro embutido para uma vazão de projeto de 49.600 m³/s, inaugurada em 1999 (KAMEL et al., 1996; e KAMEL et al., 1995), e a barragem de Miel I na Colômbia, que entrou em operação em 2002, com 188 m de altura, em região sismicamente ativa, possuindo 1.750.000 m³ de CCR colocados em 25 meses, gerando uma econômica de 7 meses em relação aos arranjos alternativos propostos (SANTANA e CASTELL, 2004). A barragem de Miel I, mostrada na

Figura 2.1, é hoje a mais alta barragem de CCR do mundo, seu projeto considerou zoneamento da barragem em quatro regiões com consumos de cimento variando de 85 a 150 kg/m³, visando satisfazer as especificações de projeto de resistência característica à tração variando respectivamente de 1,4 a 2,4 MPa. No empreendimento, o controle de estanqueidade do maciço considerou a colocação a montante de película de PVC, cujas faixas foram soldadas termicamente.

Paralelamente, no Japão, foi desenvolvida técnica de compactação denominada RCD (Roller Compacted Dam), onde o CCR é colocado em blocos monolíticos de 15 m de espessura, com juntas cortadas mecanicamente após a compactação (ANDRIOLO, 1998; HANSEN e REINHARDT, 1991; HIROSE, 1982; TAKAHI, 1999; KOKUBU, 1985; JNCOLD, 1982). Neste caso, desenvolveram-se especificações técnicas muito severas com a imposição do concreto compactado com rolo estar completamente encamisado por concreto convencional, com objetivo de garantir a estanqueidade e a durabilidade das superfícies exteriores. Esta técnica não procura a otimização em termos de consumo de cimento da mistura, e tem critérios de projeto estruturais muito conservadores, herança de um país com problemas de sismicidade severa. O primeiro teste de campo da técnica foi executado na ensecadeira de montante da Barragem de Ohkawa, em 1976. O método japonês teve sua primeira aplicação de grande porte na Barragem de Shimajigawa, em 1982, com a aplicação de 165.000 m³ de CCR, que serviu embasamento para os desenvolvimentos seguintes. O grande marco para a engenharia com este tipo de solução é representado pela barragem de Tamagawa, com 100 m de altura, com 1.150.000 m³, sendo cerca de 1.000.000 m³ de RCD, em 1987.



(a) durante a construção



(b) Situação final

FIGURA 2.1 Fotografias Panorâmicas da Barragem de Miel I

Fonte: SANTANA e CASTELL, 2004

Após os sucessos obtidos em barragens de gravidade, passou-se ao desenvolvimento de barragens em arco-gravidade e arco. O *Department of Water Affairs and Forestry* da África do Sul projetou e construiu as primeiras estruturas em arco em CCR do mundo (GERINGER, 1995; SHAW, 2003). Duas barragens de arco-gravidade foram executadas em CCR, a primeira Knellpoort, com 50 m de altura e terminada em 1988; e a barragem de Wolwedans, com 70 m de altura e terminada em 1989. Durante o desenvolvimento deste tipo de solução estrutural, foram desenvolvidos processo que garantam a possibilidade de injeção de juntas, procurando garantir o funcionamento monolítico da barragem.

Na China, país com enormes recursos hídricos, pesquisou-se e se colocou em projeto e construção várias barragens em arco de CCR (CHONGGANG, 2003; SEMBENELLI E SHENGPEI, 1998), conforme descrito na Tabela 2.1, que contém as principais características dos empreendimentos.

TABELA 2.1 Barragens de CCR em Arco na China

| NOME | TIPO | ANO | TIPO (****) | ALTURA (m) | CRISTA (m) | C/A | VOLUME (m ³) |
|--------------|-------------|------|----------------|---------------|---------------|------|-----------------------------|
| Puding | Principal | 1994 | AD | 75 | 196 | 2,6 | 103.000 |
| Wenquanbpu | Principal | 1994 | A | 48 | 188 | 3,9 | 55.000 |
| Xibinxi | Principal | 1995 | A | 64 | 96 | 1,5 | 26.000 |
| Hongpo | Principal | 1999 | A | 55 | 244 | 4,4 | 71.000 |
| Longshou | Principal | 2001 | PB | 80 | 141 | 1,76 | 187.000 |
| Shimenzi | Principal | 2001 | AD | 109 | 169 | 1,55 | 188.000 |
| Shapai | Principal | 2002 | A | 129 | 258 | 2,0 | 365.000 |
| Linhekou | Principal | 2004 | AD | 100 | 311 | 3,1 | 229.000 |
| Zhaolaihe | Principal | 2005 | AD | 107 | 206 | 1,9 | 166.000 |
| Xuanmiaoguan | Principal | 2005 | A | 62 | 192 | 3,0 | n.d.(*****) |
| Maobaguan | Principal | 2004 | A | 64 | 156 | 2,43 | n.d. |
| Jiangya | Ensecadeira | 1995 | A | 25 | 230 | 5,2 | 35.000 |
| Dashaonshan | Ensecadeira | 1998 | AD | 52 | 180 | 2,8 | 60.000 |
| Geheyan | Ensecadeira | 1989 | AG | 40 | 310 | 6,2 | 100.000 |

(*)C, significa em construção

(**)P, significa em projeto

(***) Principal, significa barragem principal

(****) A - arco, AD - arco com dupla curvatura, AG – arco gravidade, PB – Parabólico

(*****) nd – não disponível

Fonte: CHONGGANG, 2003; SEMBENELLI E SHENGPEI, 1998

No Brasil (ANDRIOLO et al., 1984; KUPERMAN, 1996; MACHADO et al., 1995), os primeiros estudos de CCR, foram desenvolvidos na Itaipu Binacional para utilização de rampa de acesso em 1978, com aplicação de 28.000 m³ no preenchimento das adufas de desvio (NETTO et al., 1995). No mesmo ano foram executados 40.000 m³ de CCR para preenchimento das adufas de desvio da Usina Hidrelétrica de São Simão. A primeira aplicação em estrutura permanente foi feita em 1982, em parte das eclusas de navegação da Barragem de Tucuruí, no Pará (CAMPITELLI, 1983; PIMENTEL et al., 1985). A primeira aplicação em barragem de grande porte ocorreu em 1986, na Barragem de Saco de Nova Olinda, na Paraíba, barragem de concreto a gravidade com 56 m de altura e com a aplicação de 135.000 m³ de CCR, que, também, tem como mérito ser a primeira barragem de CCR com eixo longitudinal em curva no mundo (DANTAS e HOLANDA).

Depois destas experiências pioneiras, a década de 90 viu um grande desenvolvimento das barragens de CCR, com as barragens de pequeno volume como Caraíbas, da CEMIG em 1990; Gameleira e Cova da Mandioca da CODEVASF; e, Juba I e Juba II da Itamarati do Norte S.A (DOELHER et al., 1995).

Estas obras foram seguidas pelas primeiras barragens de grande porte, as duas no Paraná. A primeira é a Derivação do Jordão, da COPEL no Paraná, com 547.000 m³ de CCR e 95 m de altura, apresentada na Figura 2.2. Esta barragem, apesar de ser projetada em solução de concreto a gravidade, tem eixo longitudinal curvado por motivos hidráulicos, e como característica importante a execução de licitação com o empreiteiro podendo escolher entre arranjo com barragem em CCR e com barragem em enrocamento com face de concreto (MARQUES FILHO, et al., 1996; BLINDER et al., 1995). A outra barragem de porte, a Usina Hidrelétrica Salto Caxias, também foi executada no Paraná, pela COPEL, em 1998. Esta barragem tem 66 m de altura e um volume de CCR de 912.000 m³ de um volume total de concreto de 1.438.000 m³, e potência instalada de 1.240 MW, mostrada na Figura 2.3. Como característica importante deste aproveitamento, a barragem tem vertedouro embutido em seu corpo projetado para uma vazão de projeto de 50.000 m³/s (KAMEL et al., 1996; KREMPEL e PEREIRA, 1997). O projeto da barragem de Salto Caxias considerou a possibilidade de ocorrência de galgamentos durante a execução (LEVIS et al., 1998; e SAKS, 1999). Ocorreu um total de 7 galgamentos, destacando-se a passagem de 18.000 m³/s sem qualquer dano à praça de CCR, apesar de danos severos na fundação.

Também cabe mencionar as barragens de Val de Serra e Bertarello, da CORSAN e de Dona Francisca, da DFESA, todas no Rio Grande do Sul, com excelente qualidade do CCR, sob

as óticas de parâmetros de resistência mecânicos, permeabilidade e de homogeneidade do maciço, com coeficientes de variações expressivamente baixos em relação a outros empreendimentos hidráulicos (ULHOA et al., 1998; FRANCO et al., 1998 e 1998b; ANTUNES SOBRINHO, 1998; MOSER et al., 2003, CBGB et al., 1989). A Barragem de Dona Francisca, mostrada na Figura 2.4, foi a pioneira na utilização dos maciços experimentais de CCR em laboratório para auxílio na tomada de decisão sobre processos executivos e auxiliar na definição das misturas iniciais utilizadas na construção da obra. A Figura 2.6 mostra a barragem de Dona Francisca em construção, podendo ser observadas as facilidades industriais principais da obra.

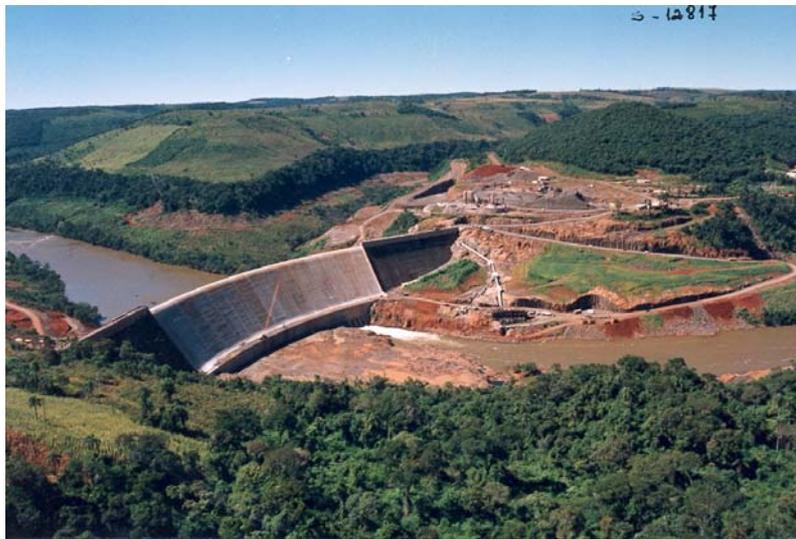


FIGURA 2.2 Barragem da Derivação do Rio Jordão no Final da Construção



FIGURA 2.3 Vista Geral da UHE Salto Caxias



FIGURA 2.4 Vista Geral da UHE Dona Francisca

Hoje, no Brasil, grandes obras recém inauguradas no Rio Tocantins, no estado de Goiás utilizaram com sucesso CCR. A Usina Hidrelétrica de Cana Brava, com um volume aplicado de CCR de 400 mil m³ em barragem com altura máxima de 71m (BABÁ et al., 2002). A Usina Hidrelétrica de Lajeado foi a primeira a utilizar a técnica do concreto rampado ou chinês, com aplicação de 210 mil m³ de CCR em barragem com altura máxima de 43 m (BATISTA et al., 2002; e GRAÇA et al., 2003).

A solução em CCR continua competitiva em termos de Brasil, sendo adotada em várias obras de grande porte, podendo ser destacadas a ampliação da Usina de Tucuruí, no Pará, e as usinas hidrelétricas de Santa Clara (Figura 2.5) e Fundão, no Rio Jordão, estado do Paraná. Nestas últimas, está em desenvolvimento adaptação do lançamento em concreto rampado, procurando minimizar a utilização de argamassa de ligação entre camadas (CARDOSO et al., 2004).

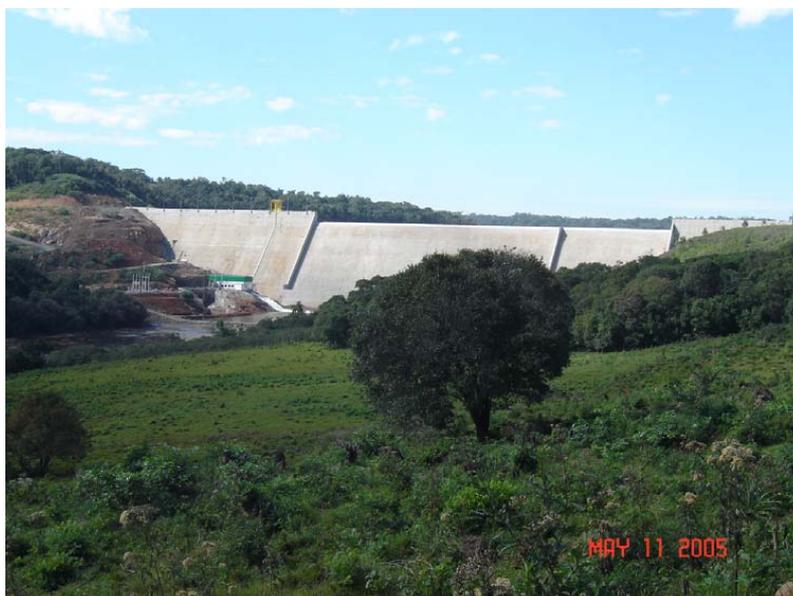


FIGURA 2.5 Vista Geral de Jusante da Barragem de Santa Clara
Fonte: Relatório Fotográfico do Consórcio Construtor Complexo Jordão

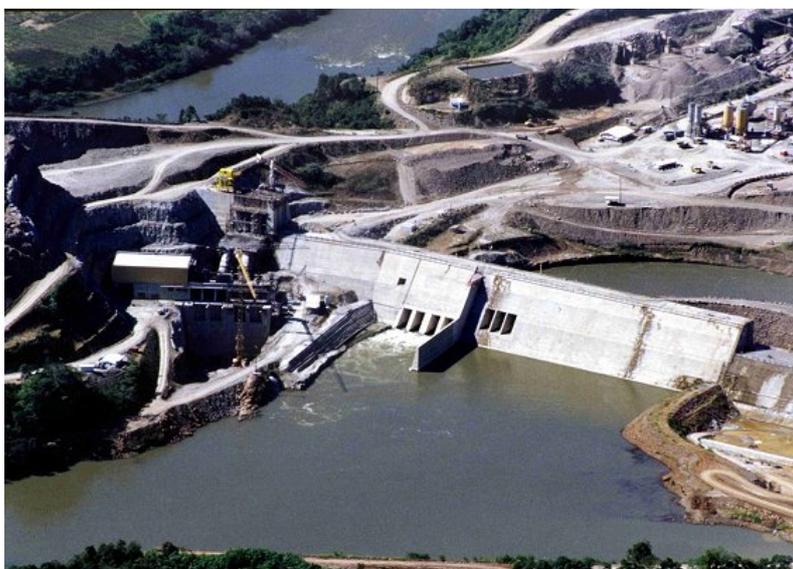


FIGURA 2.6 Vista Geral de Jusante da Barragem de Dona Francisca durante a Construção

2.2 BARRAGENS DE CONCRETO

A utilização do concreto como material de construção de barragens de aproveitamentos hidráulicos ocorre a mais de 120 anos, permitindo a obtenção de um banco de dados confiável sobre o comportamento deste tipo de obra. Os modelos de comportamento são bem conhecidos, balizados pela instrumentação e monitoramento de obras existentes. (CBGB et al., 1989; CBGB, 1999; SHARMA, 1981; CREAGER et al., 1965; GRISHIN, 1982; SCHREIBER, 1981; VARLET, 1972; HANSEN e REINHARDT, 1991; ANDRIOLO, 1998; e PACELLI DE ANDRADE et al., 1997).

A Figura 2.7 mostra uma planta e corte longitudinal de barragem de concreto a gravidade, e na Figura 2.8 está representada uma seção transversal esquemática típica deste tipo de empreendimento.

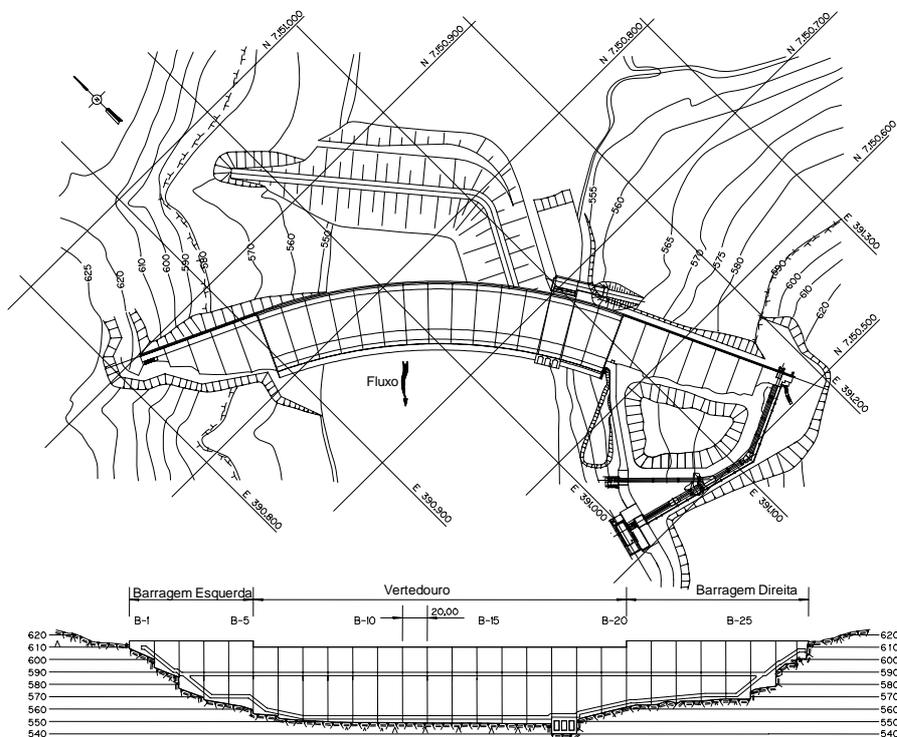


FIGURA 2.7 Planta e Corte Longitudinal de Barragem de Concreto a Gravidade
Fonte: Projeto Executivo da Derivação do Rio Jordão – COPEL Companhia Paranaense de Energia

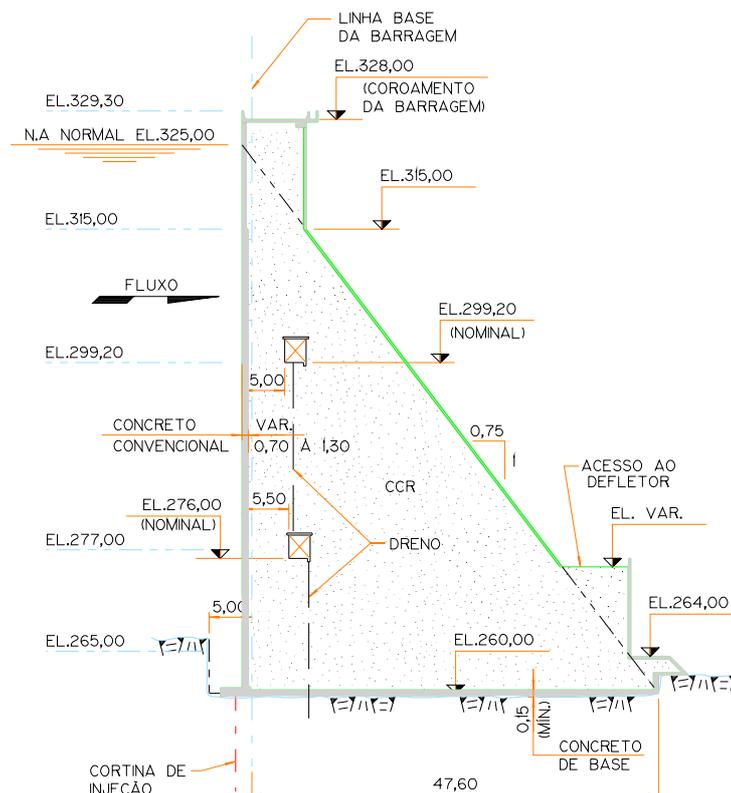


FIGURA 2.8 Seção Transversal Típica de Barragem de Concreto a Gravidade
 Fonte: Projeto Executivo da UHE Salto Caxias – COPEL Companhia Paranaense de Energia

A estrutura está sujeita, principalmente, às solicitações geradas pelo peso próprio, empuxos de água, esforços gerados pela percolação de água, variações volumétricas derivadas da reação do cimento e da variação das condições ambientais, além de efeitos sísmicos. Simula-se seu comportamento estrutural imaginando o corpo representado por suas seções transversais em regime elástico considerando a hipótese de deformações planas, ou através do estudo de blocos como um todo, efetuando análise em regime elástico, via Método dos Elementos Finitos.

Estudos de estabilidade simplificados são executados nas prováveis superfícies de ruptura considerando estas seções como planas, sendo importante a caracterização das envoltórias de resistência das interfaces concreto-rocha e das juntas entre camadas de concretagem sucessivas (SHARMA, 1981; CREAGER et al., 1965; GRISHIM, 1983; SCHREIBER, 1981; e, VARLET, 1972).

A Figura 2.9 mostra uma seção típica de uma barragem de concreto a gravidade, explicitando seus componentes principais e os carregamentos hidráulicos gerados pelo reservatório, e nesta seção em particular, não há presença de água na sua face de jusante. Como a fundação e o concreto são materiais porosos, instala-se um campo de propressões nestes corpos, gerado pela passagem de água sob pressão que deve ser considerado na análise de segurança da

barragem. A rocha da fundação deve ser analisada no processo, verificando-se a estabilidade de possíveis fraturas existentes ou induzidas pela limpeza através do desmonte com explosivos.

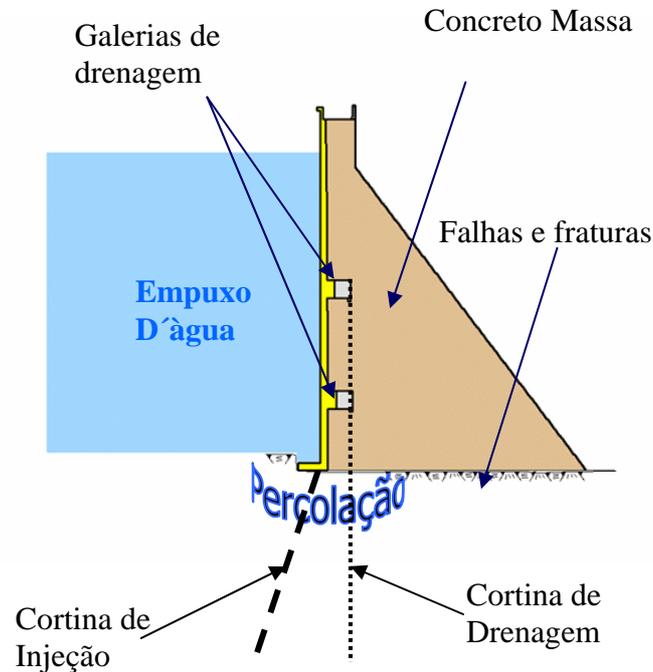


FIGURA 2.9 Seção Transversal Esquemática Típica – Barragem de Concreto a Gravidade

No desenvolvimento destes empreendimentos deve ser considerado:

- Controle dos efeitos da reação termogênica do cimento, minimizando-se seu consumo e prevendo juntas transversais de retração que inibam a fissuração do maciço. Como conseqüência desta necessidade surgiu o conceito de concreto massa.
- Cuidados com a conformação geométrica da estrutura e da fundação são importantes para evitar concentrações de tensões que gerem fissuras que podem ser potencializadas pelo efeito térmico (GRISHIM, 1983; VARLET, 1972; ICOLD-CIGB, 1997).
- Controle da percolação pelo maciço de concreto e suas fundações de modo a minimizar os efeitos da subpressão, e garantir a durabilidade da estrutura. Na Figura 2.9, o controle da percolação pelo maciço é feita através de camada de baixa permeabilidade a montante, cortina de drenagem (furos perfurados em geral entre 2 e 4 m) e galeria de drenagem. Na rocha de fundação, em geral, são previstas cortinas de

injeções de cimento para diminuir a permeabilidade junto à face de montante e cortina de drenagem conectada às galerias, cuja conceituação e proposta de dimensionamento foram sedimentadas no trabalho de CASAGRANDE, em 1961 (MASON, 1988).

- Estudos de fluência devem ser efetuados em regiões com variação abrupta das alturas de concreto colocadas num mesmo bloco da barragem ou em defasagem prolongada de altura do topo concretado de blocos adjacentes.
- Estudos dos materiais componentes do concreto para se evitar as reações deletérias, principalmente a reação álcali-agregado.
- As envoltórias de resistência das interfaces concreto-rocha e das juntas entre as camadas de concretagem sucessivas.
- Determinação de ensaios que caracterizem adequadamente o comportamento material e permitam o controle da qualidade sistemático do concreto.
- Previsão de sistema de garantia da qualidade adequado com possibilidade de análise global do processo e que permita ser avaliado em sua eficiência.
- Cuidados com as juntas de concretagem são importantes para garantir a continuidade das propriedades do concreto e evitar a formação de caminhos preferenciais de percolação, devendo estar a superfície que receberá o novo concreto totalmente livre de impurezas. São importantes os tratamentos a base de jateamento com areia e limpeza com água e ar, podendo estes últimos serem substituídos por corte com jato de água a alta pressão (USB, 1975). O contato concreto rocha deve prever a limpeza total da fundação, retirando impurezas, material degradado e blocos fraturados soltos ou com falhas que possam afetar a segurança da estrutura. Pode ser utilizada argamassa de berço para melhorar o contato (USB, 1975), ou a aplicação de concretos fluidos.

2.2.1 Concreto Massa

Como já mencionado, o primeiro registro de controle tecnológico nos Estados Unidos da América ocorreu em 1888, na Barragem de Crystal Springs, na Califórnia. A tecnologia inicialmente incipiente, foi desenvolvida com o crescimento contínuo dos materiais utilizados e o aperfeiçoamento da técnica de construção; e, também, foram sendo estudados os fenômenos de

permeabilidade do concreto e da fissuração térmica. A partir das aplicações iniciais de concreto como material de construção nos aproveitamentos hidráulicos, o conhecimento crescente levou aos estudos sobre a moagem dos cimentos, controle dos produtos do clínquer, efeito da petrografia e granulometria dos agregados e sobre os processos de cura (CBGB et al., 1989).

A evolução da tecnologia de concreto aplicada às barragens de concreto e estruturas complementares levou a diminuição contínua dos consumos de cimento, com o desenvolvimento de critérios de dosagem e de controle de qualidade efetivos, (CBGB et al., 1989; MEHTA e MONTEIRO, 1994), conforme ilustrado na Tabela 2.2, culminando com o conceito de concreto massa. O concreto massa é definido como aquele que independentemente de sua constituição ou granulometria, possui volumes e formas tais que requer meios especiais para controlar os efeitos da geração de calor e sua conseqüente mudança de volume (MEHTA e MONTEIRO, 1994; IBRACON, 1986). Apesar dos conceitos referentes ao estudo do concreto massa possam ser empregados em quaisquer obras com volumes ou condições especiais que exijam cuidados com as variações volumétricas, este trabalho focará basicamente a aplicação em barragens de concreto.

No Brasil, a evolução da tecnologia de concreto aplicada aos aproveitamentos hidráulicos teve grande impulso a partir do final da década de 50, coincidindo com o esforço de industrialização do país. Um marco importante do desenvolvimento técnico do concreto massa foi a construção da Usina Hidrelétrica Ilha Solteira, que contou com a consultoria do Dr. Roy W. Carlson, da Universidade de Berkeley, que auxiliou no forjamento dos conceitos envolvidos em tecnologia de concreto, propiciando o grande desenvolvimento do concreto massa no país nas décadas seguintes (CBGB, 1982, POLIVKA, 1968). Aliadas a um controle de qualidade rigoroso, várias inovações surgiram em termos de Brasil, como a utilização de cimentos com baixos teores de álcalis e pozolanas para combate da reação álcali-agregado, pozolana obtida a partir de argila caulínica, utilização de centrais de resfriamento e produção de gelo, e estudos térmicos utilizando ensaios para caracterização térmica dos materiais aplicando o Método dos Elementos Finitos. Durante as obras de concreto massa que se seguiram, o aprendizado baseado nos estudos e nos resultados dos ensaios e da instrumentação culminou com o desenvolvimento do método de dosagem baseado no módulo de finura desenvolvido pela equipe de FURNAS (BITTENCOURT, 2001; GUERRA, 1996), coordenada pelo Engenheiro Walton Pacelli de Andrade e seguindo orientações do Dr. Carlson.

TABELA 2.2 Evolução dos Consumos de Cimento no Tempo

| DATA | APROVEITAMENTO | CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³) |
|-----------|------------------------|---|
| 1900-1930 | Média de várias obras | 350 |
| 1936 | Norris Dam (EUA) | 225 |
| 1940 | Hiwasee Dam (EUA) | 168 |
| 1954 | Pine Flat Dam (EUA) | 130 |
| 1970 | Ilha Solteira (Brasil) | 100 |
| 1978 | Água Vermelha (Brasil) | 90 |

Os principais conceitos envolvidos na dosagem de concreto massa estão brevemente apresentados no Capítulo 4, que discute a dosagem de concreto compactado com rolo com alto teor de finos.

2.2.2 Variações Volumétricas e Fissuração de Origem Térmica

Desde o início da aplicação de concreto em barragens de aproveitamentos hidráulicos e de suas estruturas complementares, surgiram preocupações quanto a permeabilidade e fissuração de origem térmica decorrentes das reações exotérmicas geradas pela hidratação do aglomerante.

O controle das variações volumétricas é feito através do controle da temperatura de lançamento, cura com pós-refrigeração, dosagens adequadas, limitação da altura das camadas e de seus intervalos de lançamento, e pelo dimensionamento de juntas de contração, que são complementadas por dispositivos de vedação e quando necessário chavetas ou almofadas. Estas últimas podem ser previstas quando da necessidade de garantir o funcionamento estrutural conjunto dos diversos blocos, e podem ser acompanhadas por sistemas de injeções que garanta a continuidade após a diminuição de volume.

As juntas de construção devem ser projetadas para satisfação do cronograma de obra, considerando os equipamentos de construção disponíveis. A determinação da altura das camadas será função de análise das conseqüências do fenômeno térmico desenvolvido, devendo ser considerados:

- Propriedades mecânicas e térmicas do concreto e da fundação

- Condições ambientais do local da obra
- Geometria do maciço de concreto e da fundação e o grau de restrição ao movimento da fundação
- Presença e tipo de refrigeração do concreto
- Tipo de formas e tempo de desforma
- Métodos construtivos utilizados
- Posicionamento dos equipamentos embutidos.

Muitas das especificações de concreto adotam quando da ausência de dados ou estudos, para barragens usuais com alturas entre 30 e 120m, camadas de concretagem com altura entre 1,5 m e 2,0 m, com intervalos de lançamento ao redor de 3 dias (IBRACON, 1986; IBRACON 1989; USBR, 1975).

Para diminuição dos efeitos térmicos, para prevenção de reações expansivas, e melhorar a coesão do concreto torna-se importante a utilização de pozolana na mistura. Como estas estruturas possuem um tempo de execução longo, em geral maiores que 1 ano, permite que se especifiquem idades de controle mais avançadas entre 90 e 180 dias, que proporcionam a obtenção de concretos com menores consumos de cimento. Outra vantagem clara do processo é a diminuição potencial da permeabilidade, com o conseqüente aumento da durabilidade do material.

2.2.2.1 Avaliação dos Efeitos Térmicos e Fissuração Térmica

A presença de fissuras em barragens não é incomum, porém sua presença é indesejável, podendo ou não estarem associadas à percolação de água. Sua presença gera cuidados especiais durante a vida útil através da monitoração constante, ou pode indicar a necessidade de intervenções nos maciços (ICOLD-CIGB, 1997). As principais causas de fissuras em barragens são: fissuras devidas à retração plástica, ataque de sulfatos, reações álcali-agregado e similares, corrosão da armadura, assentamento do concreto, erros de acabamento, congelamento e degelo, concretagem em rampa, movimentos da formas, assentamento das fundações, fissuras geradas por carregamentos excessivos ou induzidas dinamicamente, formação de etringita tardia,

alterações volumétricas gerada pelos fenômenos de origem térmica no concreto (ICOLD-CIGB, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 1994; PAULON, 1987, PACELLI DE ANDRADE et al., 1997). Tomados os cuidados com a caracterização dos materiais e com a adoção de processos construtivos que minimizem as falhas geradas na colocação e adensamento, ou devidas à deficiência de processo de cura, o controle da fissuração térmica passa a ser predominante nas preocupações de obras de concreto massa aplicada aos aproveitamentos hidráulicos.

A avaliação dos fenômenos térmicos em obras de concreto massa é importante para que se evite fissuração indesejável, que potencialmente possa modificar as condições de permeabilidade da face de montante da barragem, ou gerar fenômenos de deterioração do material em seu interior. O fenômeno está ligado basicamente às restrições às variações volumétricas geradas pelas reações termogênicas da hidratação dos aglomerantes e por variações das condições ambientais. O concreto lançado sofre restrições à mudança de volume, devidas à rocha da fundação e ao concreto das camadas anteriormente colocadas, gerando um campo de tensões no concreto, que pode gerar um panorama de fissuração (CARLSON et al., 1979).

O processo construtivo de barragens de concreto é complexo, tendo cronogramas de execução em geral superiores a 1 ano. Cada lançamento efetuado inicia durante o processo de endurecimento o desencadeamento da geração de calor pela reação de hidratação, recebendo restrições das camadas anteriores, cada uma com sua característica de resistência, módulo de elasticidade, coeficientes de fluência que variam com o tempo; e também, gerando continuamente calor. Como o crescimento da obra, inclui-se novas porções de concreto que geram calor, bem como as camadas anteriores continuam com calor gerado que necessita ser dissipado, em sistema cujas condições de contorno mudam continuamente devido à execução. Para entendimento dos fatores que atuam no processo, tomando-se uma camada finita lançada integralmente em um único processo, sobre uma fundação deformável, conforme indicado na parte superior da Figura 2.10. A tensão em qualquer altura do eixo de simetria vertical c pode ser dada como (PAULON, 1987; MEHTA e MONTEIRO, 1994):

$$\sigma = K_a \cdot k_r \cdot \Delta\theta \cdot \alpha \cdot \frac{E_c}{1 + \Psi} \quad (2.1)$$

Onde:

σ : Tensão ao longo do eixo de simetria da camada

K_a : Coeficiente de restrição devido à fundação considerada com infinitamente rígida

k_r : Coeficiente de minoração de K_a , levando em conta a deformabilidade da fundação e do concreto

$\Delta\theta$: Diferença de temperatura

α : Coeficiente de dilatação térmica do concreto

E_c : Módulo de Elasticidade do concreto

Ψ : Coeficiente de fluência do concreto

Esta equação pode ser colocada como função das deformações, considerando ε a deformação em um ponto qualquer do eixo de simetria da camada:

$$\varepsilon = K_a \cdot k_r \cdot \Delta\theta \cdot \alpha \cdot \frac{1}{1 + \Psi} \quad (2.2)$$

Como critério básico de resistência, ocorre fissuração quando a tensão de tração que surge no corpo for superior à resistência à tração do concreto. Apesar da simplicidade da situação ilustrada, analisando a equação, verifica-se:

- A fissuração depende da diferença entre o pico máximo de temperatura atingido e a temperatura ambiente à qual ele atingirá durante o processo termodinâmico de resfriamento. As variações volumétricas do concreto são função das reações termogênicas do cimento e outros materiais cimentícios, da temperatura inicial de lançamento do concreto, da qualidade e petrografia dos agregados utilizados, e das deformações higrométricas do concreto.

- Quanto ao aglomerante, o consumo de cimento deve ser minimizado, e quando possível eleger-se para utilização cimentos que possuam menor geração de calor, sendo desejáveis cimentos com baixa relação C_3A/SO_3 e baixos teores de cal livre e MgO , limitando-se dentro do possível as parcelas de aluminato tricálcico (C_3A) e de silicato tricálcico (C_3S). A utilização de material pozolânico adequado, como substituição de parte do cimento, pode levar a diminuição de aproximadamente 50% do calor de hidratação (PAULON, 1987).
- O controle da temperatura de lançamento é um fator de controle que pode permitir a diminuição do pico final de temperatura no maciço de concreto. A utilização de pré-refrigeração do concreto permite que se controle a temperatura de lançamento através do esfriamento do agregado gráudo, resfriamento da água de amassamento e/ou substituição de parte da água de amassamento por gelo, desde que embasada em estudos de viabilidade técnica-econômica (PAULON, 1987; ANDRIOLO e SKWARCZYNSKI, 1988).
- Processos de pós-refrigeração, através da passagem de água por tubulação embutida no concreto permitem a diminuição do gradiente de temperatura.
- Quanto maior for a deformabilidade do corpo de concreto menores serão as tensões induzidas pelas variações de volume. A análise do processo requer a caracterização dos parâmetros mecânicos do concreto, como módulo de elasticidade, fluência e, em estados múltiplos de tensão, o coeficiente de Poisson. Como o processo é dependente do tempo, bem como todos os parâmetros mencionados, sua variação passa a ser importante em análises mais complexas.
- As propriedades térmicas do concreto devem ser determinadas, sendo particularmente importantes os ensaios para a determinação do coeficiente de dilatação térmica do concreto e de elevação adiabática de temperatura.
- A restrição da rocha dependerá da relação entre os parâmetros de sua deformabilidade e a do concreto, e da altura em que a tensão está sendo determinada. Obviamente, a restrição é mais intensa junto à fundação, diminuindo com a altura do ponto considerado na camada, como pode ser observado na Figura 2.10, proposta por ACI 207.2R, apud MEHTA e MONTEIRO, 1994, onde o valor 1,0 corresponde a restrição total.

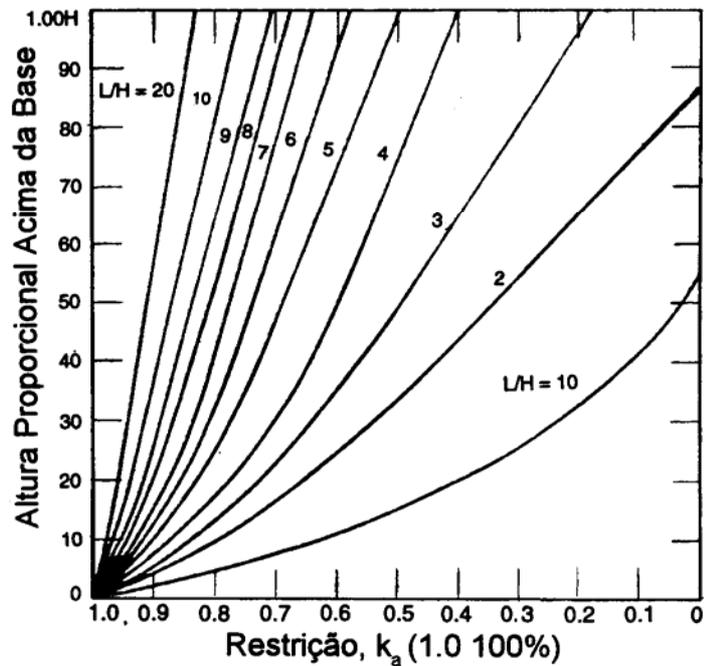


FIGURA 2.10 Coeficientes de Restrição considerando a Fundação Infinitamente Rígida
 Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 1994

O fenômeno térmico de barragens de concreto, apesar de mais complexo que o modelo acima, segue os mesmos princípios básicos expostos. Soluções gerais podem ser feitas através de estudos no meio contínuo, através da resolução da equação termodinâmica de troca de calor em conjunto com modelos mecânicos tridimensionais. Estes estudos podem ser simplificados, dependendo das condições de contorno existentes e seu objetivo é a determinação do campo de temperaturas desenvolvidos na peça e os correspondentes campos de tensão e deformação (PAULON, 1987). Métodos usuais para o problema consideram a obtenção de soluções numéricas utilizando o Método das Diferenças Finitas ou o Método dos Elementos Finitos, devendo ser levado em conta, além dos parâmetros já discutidos, os seguintes dados: (PAULON, 1987; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997; SANTOS et al., 2005)

- Completando os dados de caracterização do concreto (elevação adiabática de temperatura, calor específica, parâmetros mecânicos de deformação) devem ser determinadas a difusividade e condutividade térmicas do concreto.
- Temperatura de lançamento do concreto.
- Panoramas de temperaturas sazonais da região da obra.
- Cronograma de execução da obra, com quantidades executadas no decorrer do tempo.
- Altura das camadas de concretagem, com respectivos intervalos de lançamento.
- Dimensões e formas da estrutura.
- Espaçamento das juntas de contração.
- Tipos e tempo de permanência dos sistemas de formas empregados.
- Tipo e tempo de cura do concreto.
- Tipo e dimensionamento da pré e/ou pós refrigeração, caso estejam previstas.
- Propriedades mecânicas, conformação geométrica e temperatura da rocha de fundação.

2.2.3 Permeabilidade e Percolação

Desde o início da aplicação de concreto em barragens de aproveitamentos hidráulicos e de suas estruturas complementares, surgiram preocupações quanto a permeabilidade e fissuração térmica. A permeabilidade do concreto é um dos fatores determinantes de sua durabilidade, sendo um dos fatores a serem controlados durante a execução, devendo ser mencionado nos critérios de projeto (MEHTA e MONTEIRO, 1994; GEYER et al., 1994), bem como a geração do campo de pressões neutras nos maciços. O concreto é um material naturalmente poroso, seja pela utilização de mais água que o necessário para garantir as reações, pela incorporação de ar no processo de produção ou pela retração. CAMPITELI apud GEYER et al. (1994) classifica os concretos quanto a porosidade como mostrado na Tabela 2.3.

TABELA 2.3 Classificação da qualidade do concreto pela porosidade

| QUALIDADE DO CONCRETO | POROSIDADE (%) |
|-----------------------|----------------|
| Excelente | 10 a 11 |
| Boa | 11 a 15 |
| Satisfatória | 16 a 18 |
| Medíocre | 19 a 22 |
| Ruim | 22 |

Fonte: CAMPITELLI, apud GEYER et al. (1994)b

No item anterior, verificou-se a importância do controle dos efeitos térmicos da hidratação, inclusive com a limitação de consumo de aglomerante. A permeabilidade do concreto íntegro é maior com a diminuição da relação água/cimento, que aumentaria em tese o consumo de cimento. Este aparente paradoxo é resolvido através da utilização de aditivos, pozolanas como substituição de parte do cimento Portland, utilização de filler na forma de agregado pulverizado ou pozolana, ou pelo zoneamento da barragem em concretos com diferentes características. A Figura 2.8 mostra uma seção transversal típica de uma barragem de concreto a gravidade, onde a face de montante é composta por concreto menos permeável que o concreto do resto do maciço.

Vários ensaios são utilizados para medida da permeabilidade, sendo mais comumente executado, para estruturas maciças, aquele desenvolvido pelo *United States Bureau of Reclamation*, que se encontra descrito no item 3.1. Este ensaio preconiza a passagem de água sob pressão em corpos-de-prova cilíndricos de concreto, medindo a água percolada e aplicando a Lei de Darcy para corpos porosos. Como descrito por Geyer et al. (1994), outros ensaios podem ser citados, como o baseado no *Swedish Standard Specification*, que verifica qualitativamente a permeabilidade através da medida da profundidade de penetração de água sob pressão. Mais ensaios referentes são dados pelas Normas Brasileiras NBR 9779, que mede a absorção por capilaridade, e a NBR 9778, que determina a absorção de água através de imersão.

Dentre os componentes do concreto, a permeabilidade da pasta varia com a evolução da hidratação, sendo o coeficiente de permeabilidade menor com a diminuição da relação água-cimento (NEVILLE, 1982). Quanto aos agregados, como descrito em NEVILLE (1982), alguns

podem ter permeabilidades maiores que de pastas de cimento. Para efeito comparativo, a Tabela 2.4 mostra o coeficiente de permeabilidade de alguns tipos de rocha e pastas com coeficientes equivalentes, apresentado por MEHTA e MONTEIRO, 1994. A permeabilidade do concreto, em geral, é maior que a destes componentes individuais, devido às microfissuras presentes na zona de transição (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

TABELA 2.4 Comparação do coeficiente de permeabilidade de rochas com pastas maduras

| ROCHA | COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (cm/s) | RELAÇÃO a/c DE PASTAS MADURAS COM IGUAL PERMEABILIDADE |
|-----------------|--------------------------------------|--|
| Basalto denso | $2,47 \cdot 10^{-12}$ | 0,38 |
| Basalto Diorito | $8,24 \cdot 10^{-12}$ | 0,42 |
| Mármore | $2,39 \cdot 10^{-11}$ | 0,48 |
| Mármore | $5,77 \cdot 10^{-10}$ | 0,66 |
| Granito | $5,35 \cdot 10^{-9}$ | 0,70 |
| Arenito | $1,23 \cdot 10^{-8}$ | 0,71 |
| Granito | $1,5610^{-8}$ | 0,71 |

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 1994

Além dos cuidados com a permeabilidade e com a fissuração, são muito importantes as ações para a diminuição dos defeitos de concretagem em obras maciças, cujos casos mais comuns são caminhos preferenciais de percolação gerados por juntas de concretagem mal preparadas, e porosidades geradas por adensamento insuficiente. Esta patologia decorre em geral de dificuldades de trabalhabilidade do material ou interferência com embutidos como vedajuntas, drenos de juntas e galerias (IBRACON, 1989).

A incorporação do vertedouro em barragens de concreto, ou qualquer outra estrutura onde haja a passagem de água com velocidades ou variações de pressão, criam condições para carregamentos que levem à erosão ou q presença de cavitação na superfície. Nestes casos, de maneira semelhante ao adotado no paramento de jusante, podem ser previstas regiões com concretos planejados para resistir a estes esforços. Este tipo de solução está apresentado na

Figura 2.11, que conta com variações expressivas de pressões na ogiva, podendo chegar a existência de pressão negativa, e velocidades que gerem a necessidade de cuidados no defletor.

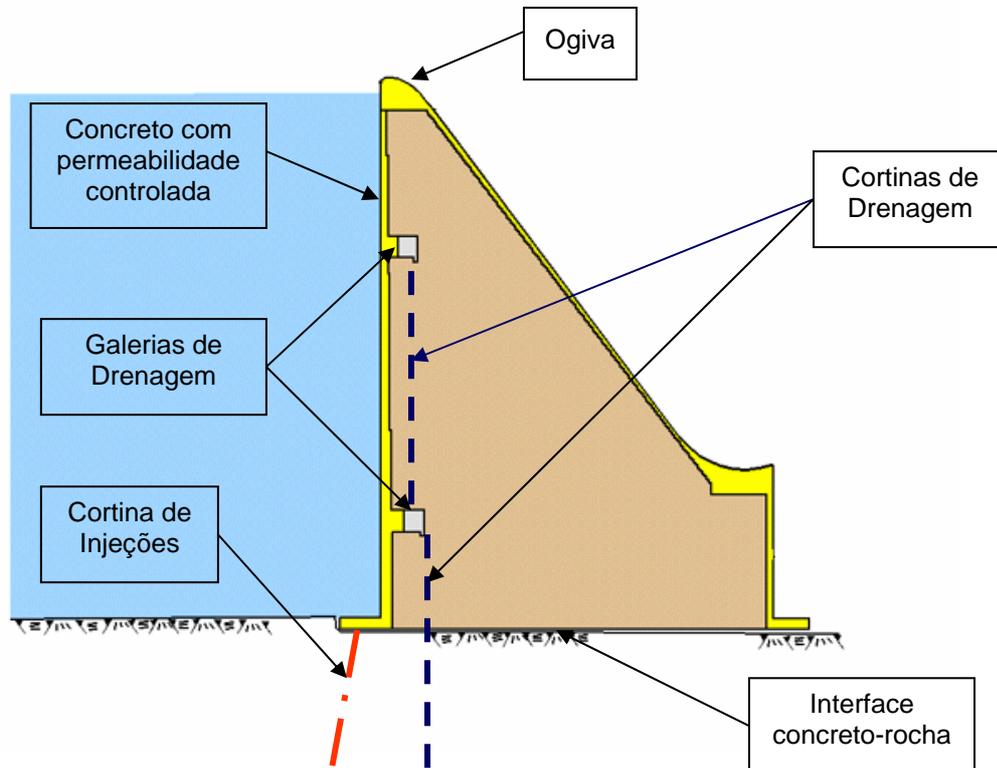


FIGURA 2.11 Seção Típica de Barragem Vertedouro de Concreto à Gravidade

2.2.4 Aditivos

Alguns aditivos são amplamente empregados em obras de concreto massa, inclusive no seu emprego em obras de barragens. Os aditivos devem ser utilizados após avaliação técnica-econômica criteriosa, considerando todas as etapas da execução da obra. Para o concreto massa, misturas relativamente pobres, entre 100 e 150 kg/m³ de aglomerante se mostraram, no início do desenvolvimento deste material, ásperas e difíceis de manusear. A utilização inicial de aditivos incorporadores de ar permitiu a diminuição do consumo de água pela melhora da trabalhabilidade que este proporciona. Apesar da potencial diminuição da resistência gerada pelo ar incorporado, as vantagens no manuseio da massa compensam esta desvantagem (IBRACON,

1986; MEHTA e MONTEIRO, 1994). MEHTA e MONTEIRO, 1994, mostram para um abatimento de 76 mm a redução do consumo de água quando da utilização de aditivo incorporador de água, conforme apresentado na Figura 2.12. O Comitê de Concreto Massa do IBRACON, baseado em resultados de várias obras semelhantes recomenda os valores de porcentagem de ar incorporado mostrados na Tabela 2.5.

TABELA 2.5 Recomendação sobre a Porcentagem de Ar Incorporado em Função do Diâmetro Máximo do Agregado

| DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO (mm) | PORCENTAGEM DE AR INCORPORADO SOBRE O VOLUME DE CONCRETO PENEIRADO NA PENEIRA ABNT 38 mm |
|--|--|
| 19 | 3 ± 1 |
| 38 | 4 ± 1 |
| 76 | 5 ± 1 |
| 152 | 6 ± 1 |

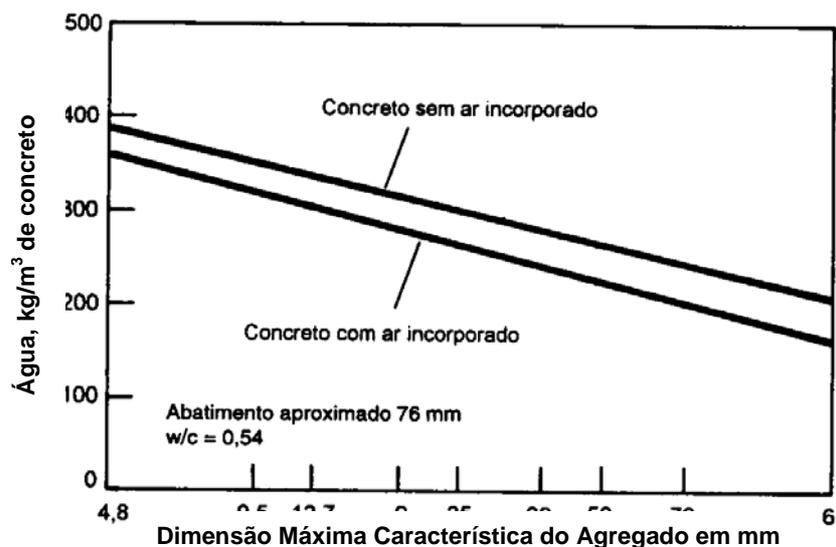


FIGURA 2.12 Consumos de Água para vários Diâmetros Máximos do Agregado Considerando a Presença de Aditivo Incorporador de Água

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 1994

Também são importantes as análises para utilização de aditivos plastificantes redutores de água que permitem uma otimização do consumo de aglomerante, que, também, são particularmente úteis em obras em climas com grande sazonalidade anual e variações climáticas importantes durante o dia. Aditivos retardadores de pega podem ser importantes em arranjos físicos com distâncias de transporte elevadas e/ou em situações de concretagem com dificuldades, permitindo diminuir a necessidade de juntas frias no concreto. No Capítulo 4, que trata da dosagem de concreto compactado com rolo com alto teor de finos, são apresentadas algumas considerações sobre utilização de aditivos nas dosagens de concreto massa.

2.2.5 Segurança

As análises de segurança devem garantir a estabilidade global, e os estados limites últimos e de serviço de suas partes. Diferentemente das obras usuais compostas por elementos estruturais simples como barras, placas e cascas, os efeitos das variações volumétricas geradas pelos fenômenos de retração e geração térmica da hidratação do aglomerante devem ser obrigatoriamente consideradas bem como os efeitos da fluência e a interação estrutura-fundação (ELETROBRÁS e CBDB, 2003; CBDB-NRSP, 1999). As normas e regulamentos usuais (ELETROBRÁS e CBDB, 2003; CBDB-NRSP, 1999) recomendam a análise da estabilidade global das estruturas, analisando o contato com as fundações, considerando a hipótese de manutenção das suas seções planas, considerando a verificação da segurança quanto à flutuação, deslizamento e limitando as tensões efetivas de tração e compressão. Apesar da resistência ao tombamento ser prática usual neste tipo de verificação, sua aplicação deve ser encarada como verificação de um índice global de segurança, que tem algum sobreamento com a análise das tensões na fundação.

Em obras de barragens a gravidade, as resistências ao cisalhamento são determinantes do material ao invés da resistência à compressão ou tração, excetuando-se as situações onde existam terremotos (ANDRIOLO, 1998; SARKARIA e ANDRILOLO, 1995). Analisando as falhas ocorridas em barragens até 1999, não levando em conta as ocorrências na China, verifica-se que as falhas por insuficiente resistência ao cisalhamento, principalmente nas seções junto às fundações correspondem às causas predominantes da ruptura deste tipo de solução estrutural (ICOLD, 1995), com mais de 30% da somatória das falhas devidas aos materiais, construção e/ou projeto.

Durante a verificação do estado de tensões na estrutura, devem ser aplicados os critérios de resistência, sendo usual, conforme já mencionado anteriormente, utilizar a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb, mostradas nas equações (2.3) e (2.4), e na Figura 3.13, (MEHTA e MONTEIRO, 1994; ELETROBRÁS e CBDB, 2003; CBDB-NRSP, 1999), sendo o campo de tensões determinado considerando os efeitos do carregamento, das pressões neutras, das variações volumétricas e, quando necessário, considerar as deformações lentas do concreto. As análises devem se estender aos vários planos que possam apresentar menores resistências ou fragilidades (CBDB-NRSP, 1999). As juntas de concretagem devem ser tratadas para minimizar a descontinuidade dos parâmetros de resistência no maciço e para evitar superfícies preferenciais de ruptura e de percolação (USBR, 1975).

A envoltória de Mohr-Coulomb pode ser expressa num ponto qualquer da estrutura pertencente a uma superfície estudada como:

$$\tau = c + \sigma.tg\phi \quad (2.3)$$

Onde:

τ : tensão tangencial

c : coesão

σ : tensão normal

ϕ : ângulo de atrito

Considerando uma superfície plana em análise, com parâmetros constantes ao longo de seu desenvolvimento, a expressão de Mohr-Coulomb pode ser estendida como:

$$T = c.A + N.tg\phi \quad (2.4)$$

Onde:

T: resultante da força de cisalhamento

c: coesão

A: área da superfície plana considerada

N: resultante da força normal

ϕ : ângulo de atrito

Nas diversas análises de segurança e no dimensionamento das barragens de concreto devem ser consideradas as seguintes ações:

- Peso próprio.
- Carregamentos hidráulicos.
- Pressão neutra ou subpressão, gerada pela percolação no meio poroso (SERAFIM, 1994).
- Pressões hidrodinâmicas, gerada pela passagem de água sob velocidade em seções com variações de forma.
- Impacto de ondas.
- Empuxos gerados por materiais granulares, como assoreamento, maciços de solo, rocha e enrocamento.
- Efeitos sísmicos, que geram esforços nos maciços de concreto e variações nos empuxos gerados pela água e pelos materiais granulares.
- Vento.
- Impacto de embarcações.
- Cargas de utilização normal das estruturas.
- Cargas dos equipamentos, que podem ser estáticas ou dinâmicas geradas pelos equipamentos rotativos ou de içamento.

- Variações volumétricas, provocadas pela retração do concreto, pelas reações termogênicas do aglomerante, pela fluência e pelas variações ambientais.
- Protensão, no caso típico de munhões de comportas.
- Recalque das fundações; e, sem se limitar.
- Mudança de forma abrupta das fundações.

O estudo do campo de pressões neutras gerados pela percolação de água foi muito controverso quando do desenvolvimento das primeiras barragens. Alguns acidentes, ocorridos no final do século XIX, levaram ao reconhecimento da importância do fenômeno para a segurança destes empreendimentos. O estudo de SERAFIM (1954) foi fundamental para o desenvolvimento dos conceitos e determinação dos esforços aplicados, mostrando a instalação ao longo do tempo de campo de pressões neutras. O trabalho conclui que, em meios porosos como a rocha e o concreto, a efetividade de aplicação do esforço chega a mais de 90%, ou seja, para a determinação numa seção qualquer da força aplicada pela pressão neutra deve ser considerada 90% de sua área de aplicação. A maioria das recomendações de projeto considera, a favor da segurança, que os esforços são aplicados na totalidade das seções analisadas (MASON, 1988). O campo independe dos esforços internos das estruturas, devendo ser considerado nas análises de equilíbrio interno e externo. Para efeito de análise mecânica surgem os conceitos de:

- Tensão total, ou seja aquela que decorrente do estudo do equilíbrio da seção em estudo;
- Tensão neutra, que corresponde ao campo de tensões gerado pela percolação, que é função única do meio poroso e das condições dos níveis de água às quais o corpo está submetido;
- Tensão efetiva, como aquela realmente aplicada aos pontos materiais componentes da estrutura, sendo numericamente igual à diferença entre tensão total e a tensão ou pressão neutra ou subpressão.

Para efeito de análise do material, as análises de resistência são efetuadas sobre as tensões efetivas existentes nos corpos analisados. A Figura 2.13 mostra duas barragens de concreto à gravidade sobre a rocha, onde são representadas as tensões na seção da base sob a hipótese de

corpo rígido com manutenção das seções planas. Nos dois casos, os campos de subpressão estão instalados nos maciços rochosos e nas estruturas e dependem somente dos níveis de água hidrostáticos de montante e jusante e dos parâmetros de permeabilidade dos materiais.

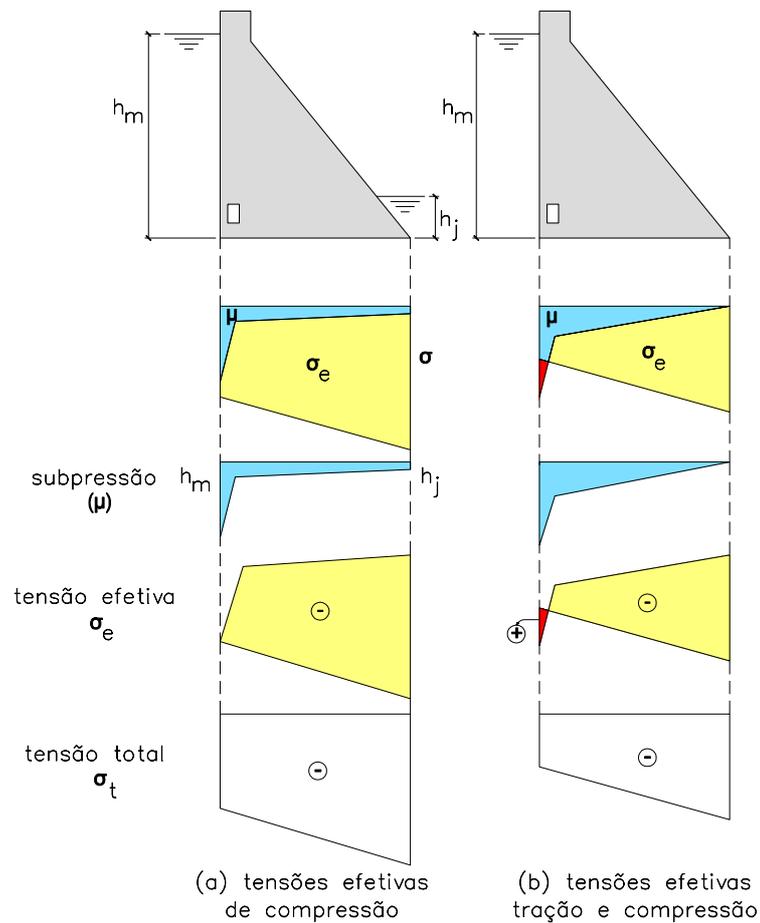


FIGURA 2.13 Diagramas de Tensões em Barragens de Concreto à Gravidade

Na Figura 2.13a, mostra-se caso em que a tensão total é superior à subpressão, surgindo tensões efetivas todas de compressão. Na Figura 2.13b, a subpressão é maior junto à face de montante, gerando uma pequena região com trações efetivas. Em ambos os casos, mostra-se a subpressão assumindo como condições de contorno os valores das pressões hidrostáticas de montante e jusante, com eficiência dos drenos equivalente a 2/3 (dois terços) da carga hidráulica existente, ou seja da diferença de pressões entre montante e jusante. Este é o valor indicado pelas recomendações brasileiras (ELETROBRÁS e CBDB, 2003; CBDB, 1999) usualmente utilizadas

para a condição de carregamento normal, que será descrita a seguir. Para efeito ilustrativo, no caso (b), o nível de água de jusante é nulo, sendo nula, portanto, a subpressão.

Nas verificações de segurança global, os blocos que compõem a barragem devem ser verificados isoladamente, considerando o carregamento em todas as direções possíveis, sendo importante nos blocos junto às ombreiras a consideração do plano de escorregamento ao longo do eixo da barragem (MARQUES FILHO, 1996; MARQUES FILHO et al., 1995; QIU, 2003). Esta verificação considera a hipótese de que a estrutura tenha comportamento de corpo rígido, considerando condições de carregamentos baseadas nas probabilidades de ocorrência ao longo da vida útil do empreendimento. As recomendações brasileiras vigentes indicam as seguintes condições de carregamento:

- **Condição de Carregamento Normal (CCN)**

Representam todas as configurações de carregamento com grande probabilidade de ocorrência durante a vida útil da estrutura, durante os procedimentos de operação e manutenção normais. Considera-se os níveis de água máximos e mínimos normais e os drenos operantes.

- **Condição de Carregamento Excepcional (CCE)**

Corresponde a uma combinação de carregamentos com baixa probabilidade de ocorrência, em geral considerando uma condição excepcional no funcionamento da estrutura, mantendo-se o restante dos carregamentos normais. Como condições excepcionais usualmente são considerados a drenagem inoperante, condições hidrológicas excepcionais efeitos sísmicos, manobras operativas de comportas e equipamentos hidrogeradores feitas em caráter excepcional. Entende-se como condição hidrológica excepcional os efeitos de cheia correspondente ao um período de retorno de 10.000 anos.

- **Condição de Carregamento de Construção (CCC)**

Representam as ações com probabilidade de ocorrer durante a execução da obra, incluindo situações de possíveis galgamentos da estrutura.

- **Condição de Carregamento Limite (CCL)**

Representa as configurações possíveis de carregamentos com mais de uma condição excepcional agindo simultaneamente. Em geral, considera-se a presença de condições hidrológicas excepcionais, drenagem inoperante, efeitos sísmicos e manobras de

caráter excepcional. Como exemplo de manobras de caráter excepcional pode ser citada a presença de comportas ensecadeiras para manutenção aplicadas durante cheias, mal funcionamento da comporta ou rejeições excepcionais de carga.

Para as verificações da estabilidade global, as recomendações brasileiras indicam:

a) Verificação de Segurança à Flutuação

Admite-se a verificação de coeficiente de segurança global à flutuação, através da relação entre os esforços gravitacionais e a integral das forças de subpressão, conforme a equação 2.5:

$$FSF = \frac{\sum V}{\sum U} \quad (2.5)$$

Onde:

FSF: Fator de segurança à flutuação

$\sum V$: Somatório de todas as forças gravitacionais geradas pelo peso próprio e as cargas permanentes mínimas da estrutura

$\sum U$: Somatório de todos os esforços verticais gerados pela subpressão na seção estudada, conforme mostrado na Figura 2.13

b) Verificação de Segurança ao Tombamento

Para a um ponto ou linha efetiva de rotação da estrutura, verifica-se a relação entre o momento estabilizante e o momento que tende a tombá-la, conforme expressão abaixo, onde se define o fator de segurança ao tombamento. Em estruturas usuais de barragens, considera-se como ponto natural de rotação o seu pé de jusante. Apesar da situação ser fictícia, pois antes de qualquer movimento as tensões induzidas levariam a ruptura do material, impõe-se um valor de referência para calibrar os níveis de segurança aceitáveis.

$$FST = \frac{\sum M_e}{\sum M_t} \quad (2.6)$$

Onde:

FST: Fator de segurança ao tombamento

$\sum M_e$: Somatório de todas os momentos estabilizantes em relação ao ponto considerado, em geral dado pelo peso próprio e cargas permanentes mínimas

$\sum M_t$: Somatório de todos os momentos de tombamento, em geral dados pelo empuxo d'água na face de montante, empuxos de terra e pela subpressão.

c) Verificação da Segurança ao Deslizamento

Para verificar a estabilidade das estruturas ao deslizamento devem ser analisados todos os planos que apresentem menores resistências ou tensões de magnitude considerável, sobre os quais a estrutura possa sofrer deslizamento como corpo rígido. As juntas de concretagem e o contato com a rocha podem apresentar, caso não corretamente tratados, caminhos preferenciais de percolação (MASON, 1988), gerados pela falta de aderência, adensamento inadequado no final da camada, aumento da fissuração local da nova camada devida aos efeitos da retração, fissuração plástica no concreto do substrato e efeitos deletérios da exsudação, dentre outros. Assim sendo a verificação da segurança ao cisalhamento nestas seções e em qualquer possível plano com resistência minorada no concreto e na fundação, são em geral considerados (CBDB, 1999).

Nas verificações da segurança ao deslizamento, verifica-se a relação entre as tensões cisalhantes na seção com aquelas que as opõem como a resistência máxima ao cisalhamento na seção para os esforços normais existentes.

$$FSD = \frac{\frac{\sum N_i \operatorname{tg} \phi_i}{FSD_\phi} + \frac{\sum C_i A_i}{FSD_c}}{\sum T_i} \quad (2.7)$$

Onde:

FSD: Fator de segurança ao deslizamento

FSD_{ϕ} : Fator de minoração da resistência devida ao atrito

FSD_C : Fator de minoração da resistência devida à coesão

i : Parcela finita com característica própria da seção estudada, função da geometria e dos parâmetros de resistência

ϕ_i : Ângulo de atrito característica dos trechos com propriedades próprias da superfície analisada

N_i : Forças normais à superfície em análise em cada trecho com características próprias

C_i : Coesão característica de cada trecho com propriedades próprias da seção em estudo

A_i : Área efetiva de contato de cada trecho característica da superfície analisada

ΣT_i : Somatória de todas as forças paralelas à superfície de deslizamento

d) Verificação das Tensões

Nas estruturas de concreto massa, trabalha-se com o Método Determinístico das Tensões Admissíveis, sendo as mesmas sempre referenciadas em relação à resistência característica à compressão do concreto, f_{ck} . Devido à grande complexidade geométrica e de comportamento do material, o desenvolvimento de modelos de dimensionamento suportou grandes desafios, sendo particularmente importantes os trabalhos de Tölke em 1938, que estudou o comportamento de cunhas de concreto sob vários carregamentos e condições de contorno (MASON, 1988). Com o desenvolvimento dos métodos numéricos e da capacidade de processamento de dados, notadamente o Método dos Elementos Finitos, obteve-se uma ferramenta que possibilita a análise do problema em suas múltiplas formas. São particularmente importantes as verificações de concentração de tensões na estrutura, de modo a se verificar os critérios de resistência adotados. Os modelos mais utilizados adotam seções transversais típicas e utilizam a hipótese de deformações planas em regime elástico linear, mas em casos específicos podem ser efetuadas simulações tridimensionais para verificação das ombreiras ou outras peculiaridades, bem como

são importantes modelos para o comportamento dos materiais mais complexos, considerando a fluência notadamente na verificação do comportamento gerado por etapas construtivas onde haja retomada de concretagem após a execução de parte da barragem, e nos estudos termo-mecânicos do concreto.

e) Fatores de Segurança Utilizados

TABELA 2.6 Fatores de Segurança e Tensões Admissíveis para Barragens de Concreto Massa

| VERIFICAÇÃO | FATOR | CCN | CCE | CCC | CCL |
|---------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Flutuação | FSF | 1,3 | 1,1 | 1,2 | 1,1 |
| Tombamento | FST | 1,5 | 1,2 | 1,3 | 1,1 |
| Deslizamento (*) | FSD | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | atrimento FSD _φ | 1,5 (2,0) | 1,1 (1,3) | 1,3 (1,5) | 1,1 (1,3) |
| | coesão FSD _c | 3,0 (4,0) | 1,5 (2,0) | 2,0 (2,5) | 1,3 (2,0) |
| Tensões Admissíveis | Compressão | 0,50 f _{ck} | 0,55 f _{ck} | 0,60 f _{ck} | 0,65 f _{ck} |
| | Tração | 0,050 f _{ck} | 0,055 f _{ck} | 0,060 f _{ck} | 0,065 f _{ck} |

(*) Os valores em parêntesis devem ser utilizados quando a caracterização dos materiais é precária.

CCN: Condição de Carregamento Normal

CCC: Condição de Carregamento de Construção

CCE: Condição de Carregamento Excepcional

CCL: Condição de Carregamento Limite

FSF: Fator de Segurança à Flutuação

FST: Fator de Segurança ao Tombamento

FSD: Fator de Segurança ao Deslizamento, sendo índice φ referente ao coeficiente de atrito e o c à coesão

Fontes: ELETROBRÁS e CBDB, 2003; CBDB, 1999

A Tabela 2.6 mostra os valores adotados para os coeficientes de segurança a serem utilizados nas análises de estabilidade global e as tensões admissíveis aceitas para o concreto massa pelas principais recomendações brasileiras (ELETROBRÁS e CBDB, 2003; CBDB,

1999). Analisando os valores, verifica-se que a confiança nos valores de coesão é menor que nos valores de atrito, gerada pela falta de confiança nos ensaios para sua caracterização pela susceptibilidade da coesão em relação aos processos executivos de juntas de construção (HANSEN et al., 1999; MASON, 1988).

Os modelos numéricos são amplamente utilizados, e durante a execução da obras podem ser calibrados através dos resultados das instrumentações existentes no maciço executado. Estas retroanálises permitem avaliar a correção das hipóteses adotadas, fornecem ferramentas para a manutenção preventivas e permitem o contínuo aumento do conhecimento do problema.

A resistência característica à compressão (f_{ck}) é um conceito estatístico, onde é feita a hipótese de que a resistência do concreto segue a distribuição normal dentro do processo de amostragem usual. Em obras de concreto convencional aplicadas às estruturas reticulares, adota-se na determinação do valor do f_{ck} o intervalo de confiança de 95% e a idade de controle aos 28 dias. Este procedimento, onde são conjuminados os conceitos de amostragem, ensaios e controle de qualidade da obra, leva, juntamente com a análise das ações a uma probabilidade de ruína adequada (FUSCO, 1976). Nas obras de barragens com volumes expressivos, são menos frequentes os defeitos de mistura do concreto que venham a interferir na totalidade de uma seção. Pelos prazos de execução relativamente maiores que os necessários às obras de edificações, a adoção de idades de controle mais avançadas permite uma economia significativa de aglomerante, diminuindo os problemas gerados pelos efeitos termogênicos. Modernamente, as recomendações brasileiras indicam como intervalo de confiança 80% (ELETROBRÁS e CBDB, 2003; CBDB, 1999), mas alguns projetistas defendem a utilização da resistência média nos dimensionamentos. Estas decisões devem ser tomadas com cautela, analisando cada caso isoladamente.

2.2.6 Barragens em Arco

As barragens em arco (Figura 2.14) são compostas por estruturas curvadas em que os carregamentos são transferidos por efeito arco ao perímetro, ao invés de, principalmente, na vertical como no modelo a gravidade.

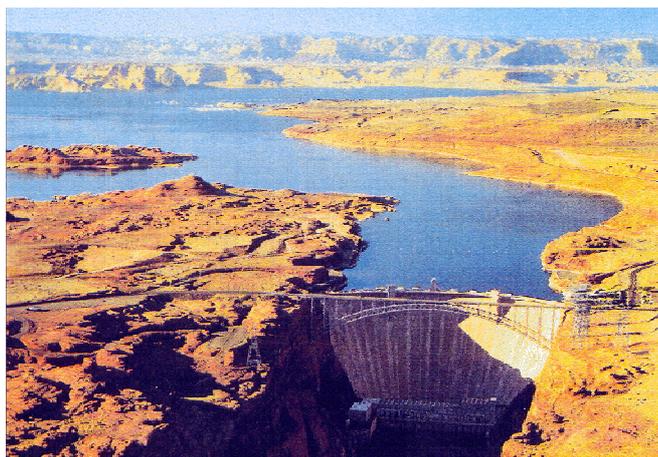


FIGURA 2.14 Vista da Barragem de Glen Canyon Rio Colorado, Arizona, EUA

A previsão de um sistema de juntas adequado é de vital importância para a segurança e planejamento da obra, com tratamento especial dos efeitos termogênicos da hidratação do cimento. Como o modelo estrutural requer uma continuidade da barragem em todas as direções, um sistema de injeção das juntas é necessário a partir do momento em que a previsão de diminuição de volume não indica a presença de estado de tensões que violem os critérios de resistência adotados.

Apesar dos modelos de cálculo mais sofisticados, os conceitos envolvidos são os mesmos discutidos para barragens de concreto a gravidade, considerando uma calibração dos processos de análise de segurança, necessitando de fundações com rochas competentes nas ombreiras, formas de vales adequadas e cuidados com a subpressão ao longo de todo o perímetro da barragem em arco.

2.3 BARRAGENS DE CCR – CONCEITUAÇÃO GERAL

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

O enriquecimento com cimento em barragens de enrocamento com granulometria contínua já era comumente utilizado quando do desenvolvimento mais expressivo do CCR, há 25 anos. Estas aplicações se concentravam, basicamente, em algumas obras de pavimentação, em zonas de transição e proteção do talude de jusante em barragens de enrocamento com face de concreto e em obras provisórias destinadas à proteção hidráulico-hidrológica (COOKE e SHERARD, 1985; COOKE, 1997). Estas soluções geraram a falsa imagem que ao executar uma obra em CCR se obteria um material grosseiro, com características de um aterro melhorado, sem condições de se obter uma homogeneidade aceitável ao longo da espessura da camada, que em enrocamentos era da ordem de 0,80 m.

Em barragens convencionais, como já discutido, as juntas horizontais sempre representaram grande preocupação dos engenheiros, tanto pela possibilidade de criação de caminho preferencial de percolação, como pelas atividades executivas que garantissem uma adequada ligação entre as camadas de lançamento e uma envoltória de resistência adequada às solicitações estruturais. Enquanto em barragens, utilizando concreto massa, tinham camadas cuja espessura variava, em geral, entre 2,0 m e 2,5 m, o método construtivo utilizando o CCR impunha valores entre 0,25 e 0,50 m, aumentando consideravelmente a quantidade de juntas horizontais ao longo de toda a barragem. Além deste fato, a consistência necessária à compactação, associada à imagem de fragilidade e fraqueza na ligação entre camadas, também gerou expectativas e insegurança entre projetistas e construtores que obstruíram inicialmente a aplicação em grande escala de soluções utilizando o CCR.

A execução do concreto compactado com rolo aplica os processos executivos usualmente utilizados em obras de terra, durante as fases de colocação (com espalhamento) e compactação. A Figura 2.16 mostra os principais passos da execução de uma obra de CCR e suas diversas frentes de trabalho. Nela está mostrado um dos possíveis esquemas construtivos utilizados normalmente, onde:

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

- Execução dos paramentos de montante e jusante em concreto convencional.

Outros esquemas alternativos de execução podem ser utilizados:

- Aplicação intensiva de correias transportadoras, conforme mostrado na Figura 2.15, onde se apresenta uma fase construtiva da barragem de Miel I, na Colômbia.
- Utilização de outros tipos de solução para a face de montante, tais como membranas de PVC, pré-moldados de concreto, concreto convencional utilizando o conceito de formas deslizantes após a execução do CCR, aplicação de concreto convencional com extrusoras móveis.
- Zoneamento da barragem com CCR menos permeável a montante, ou com várias regiões com diferentes resistências mecânicas
- Controle da massa específica por processos manuais, dentre outros



(a) Vista Geral



(b) Detalhe do Transporte

FIGURA 2.15 Equipamento para transporte de CCR usado em Miel I

Fonte: Acervo pessoal do Eng. Francisco Rodrigues Andriolo

Em todas as frentes o material deve ter a capacidade de suporte, sem ferir a produtividade ou gerar segregações, de equipamento pesado. Nota-se, no esquema mostrado na figura 2.15, características de um processo totalmente industrial, mecanizado com incidência de mão-de-obra baixa. A concepção do método executivo é extremamente simples e pode ser visualizada, em um caso real, na Figura 2.17, que mostra uma fase de execução da Usina Hidrelétrica de Salto

Caxias no rio Iguazu, estado do Paraná. Como característica importante, verifica-se a introdução de trator com sistema de pulverização para execução das tarefas de cura do concreto.

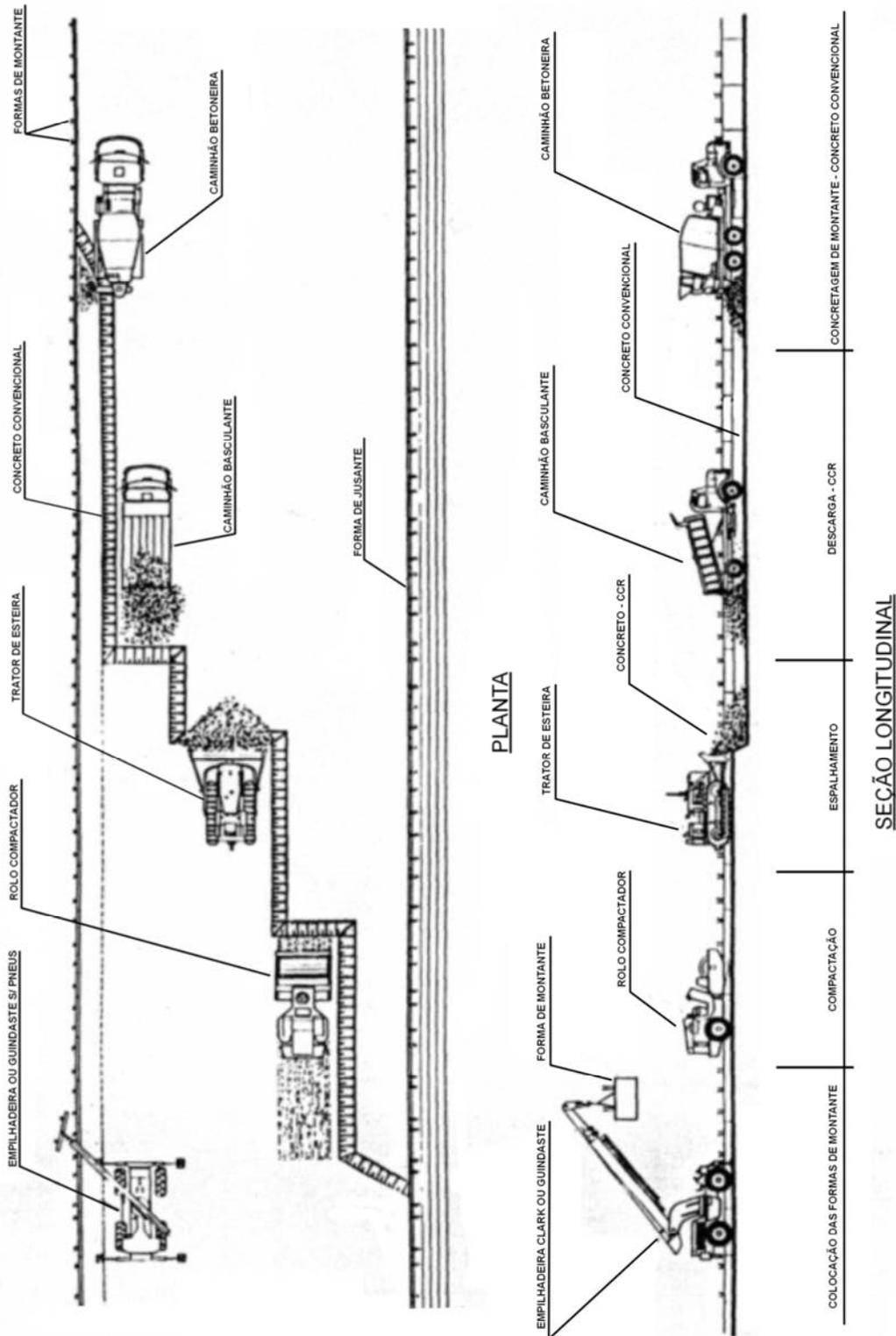


FIGURA 2.16 Detalhe Esquemático de Praça de CCR

Fonte: Proposta do Consórcio Ivaí-Torno para Execução da Barragem da Derivação do Rio Jordão



FIGURA 2.17 Praça Típica da Barragem de Salto Caxias

2.4 IMPACTO DO PROCESSO EXECUTIVO DO CCR NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

A Engenharia Civil tem como característica, que a diferencia da maioria das disciplinas semelhantes, o fato de trabalhar diretamente sobre um protótipo único, com condições de contorno variáveis caso a caso, geradas por condicionantes geológicas, topográficas e climáticas. As propriedades do material e o comportamento final da edificação devem ser previstos através de modelos físico-matemáticos simples que serão realmente aferidos após a execução parcial ou total da obra. Obviamente este fato influi na decisão de utilização do CCR, bem como, caso se opte por sua utilização, nas atividades de projeto e de controle e garantia da qualidade.

As técnicas laboratoriais para previsão do comportamento mecânico e de trabalhabilidade do concreto convencional vêm sendo sedimentadas ao longo do último século. Apesar dos ensaios de laboratório desenvolvidos nos processos de dosagem e nos processos de controle da qualidade de concreto convencional diferirem bastante das condições de campo, obtém-se relações modelo-protótipo estatisticamente comprovadas e balizadas nas análises de segurança. As discrepâncias entre a condição de laboratório e de campo são mais agudas no caso do CCR, onde os métodos usuais de ensaio não se adaptam facilmente à simulação da compactação por rolo vibratório, da ligação entre camadas e da influência das condições climáticas.

Pela necessidade de obter-se um material homogêneo e adensável, antevê-se em primeira análise a necessidade de um fechamento granular que permite a minimização do consumo de

cimento, com utilização de material fino que melhore a coesão e a trabalhabilidade do CCR, fornecendo condições de compactação adequada.

Como já foram descritos os principais fenômenos envolvidos sob a ótica de projeto e construção, discutir-se-á os impactos mais importantes da técnica construtiva nos parâmetros envolvidos. No final destas discussões, neste capítulo serão avaliadas as diversas tendências atuais de projeto, construção e controle de qualidade, bem como as pesquisas a serem desenvolvidas.

2.4.1 Características Gerais de Obra

Como descrito no item 2.3, o processo é repetitivo e muito automatizado, e as características principais podem ser resumidas como a seguir:

- Dosagem e mistura devem ser de alto desempenho em relação ao volume de construção, face às produções que se pode atingir, tomando-se cuidado com as inevitáveis variações de granulometria, das propriedades dos materiais cimentícios e aquelas devidas à sazonalidade climática, procurando minimizar os coeficientes de variação dos diversos parâmetros de controle.
- Os processos industriais utilizados têm, em geral, a característica de necessitar de grandes distâncias de transporte entre o misturador e a praça de trabalho, o que pode gerar intervalo de tempo significativo entre as duas atividades.
- Transporte geralmente é executado a céu aberto; bem como as tarefas de compactação, existindo uma grande interação com as condições ambientais.
- Praças têm áreas expostas muito grandes, indicando cuidados com a alteração do teor de água e com a cura.
- Há grande interferência com outras estruturas que compõem o corpo, causadora de possíveis descontinuidades, segregação ou contaminação.
- São comuns quantidades significativas de lançamento por unidade de tempo, gerando dificuldade de estabelecimento de padrão de controle e com conseqüências desastrosas em caso de necessidade de remoção.
- Espalhamento em grandes áreas com agregados de grandes dimensões pode levar a segregações prévias à compactação.

- Surgem preocupações com relação ao fechamento do esqueleto granular, utilizando finos para melhorar a coesão e a trabalhabilidade, visando garantir o adensamento requerido.
- Requer-se controle preciso da compactação, para garantir o adensamento desejado, sendo o grau de compactação, que relaciona a massa específica obtida com a teórica, amplamente utilizado.
- É necessário garantir ligação adequada entre camadas sucessivas, cujo processo se torna mais crítico com a passagem do tempo.
- O método de construção com CCR requer tempos entre camadas da ordem de grandeza de dia ou dias.
- O controle da compactação, inicialmente, se dá através da quantidade de passadas do rolo na região e através do acompanhamento topográfico do assentamento da camada.
- O controle final de compactação é feito através de densímetros nucleares após execução de todo o processo.
- Apesar de teores de cimento pequenos, o grande volume de concreto lançado em intervalos de tempo relativamente curtos indica cuidados especiais no controle da variação de volume e com a fissuração do maciço; exigindo projeto de juntas de contração adequado.
- Reduções na área da praça geram condições desfavoráveis ao uso da técnica, fato inevitável conforme se atinge as regiões próximas ao coroamento da barragem.
- A utilização de aditivos retardadores, aumentando o intervalo de tempo de trabalhabilidade adequada do CCR, flexibiliza o processo construtivo.

As observações anteriormente apresentadas se referem ao processo já em estado permanente, ou seja, com equipes treinadas, materiais definidos e equipamentos ajustados. Cabe discutir também os procedimentos que levaram às definições necessárias à continuidade da construção.

A Construção Civil no Brasil se caracteriza ultimamente pela grande rotatividade de pessoal e pelo pequeno treinamento gerado pela presença de empregados advindos de outras atividades econômicas. Somando-se a este fato, as obras de grande porte não têm tido uma seqüência contínua de serviços que permitam a garantia da existência de mão de obra treinada e

experiente. Esta situação não é adequada para processos industriais, que necessitam de pessoal qualificado e processos balizados que garantam a qualidade final do produto.

Como o CCR depende de uma série de atividades concatenadas complexas, com possibilidade de ocorrência de várias não conformidades, seria necessário o treinamento ou experiência prévia da equipe de trabalho. Como paradoxo, já que o treinamento tem problemas conjunturais, a eficiência e a qualidade intrínseca da obra melhoram com o tempo de trabalho, tendo as seções junto à fundação, mais solicitadas, maior probabilidade de defeitos que as mais elevadas. Outro detalhe que deve estar acertado antes do regime permanente do processo é a definição da mistura que permita trabalhabilidade adequada durante o intervalo de tempo necessário no campo e que forneça um produto final com as características especificadas.

2.4.2 Conceitos Iniciais

Como descrito, as definições iniciais do material, os métodos executivos e o treinamento da equipe de trabalho necessitam de tratamento especial. Porém, apesar de todas as diferenças técnicas de execução em relação às obras de concreto convencional, obtém-se uma estrutura de concreto, que deve atender aos requisitos de projeto e de durabilidade. A caracterização mecânica e escolha dos parâmetros de controle do concreto já estão bem sedimentadas, com ensaios com eficiência comprovada. Cabe discutir a necessidade de criação de ensaios complementares ou adaptação de ensaios existentes para o atendimento às peculiaridades da obra.

O método construtivo do CCR exige comportamentos reológicos no estado fresco diversos daqueles utilizados na concretagem convencional, criando condições de passagem do rolo compactador com eficiência e proporcionando um adensamento satisfatório. Em geral, os concretos compactados com rolo têm consistência que torna o adensamento manual com vibradores de imersão ineficaz ou penoso. Esta alteração da reologia conduz a dificuldades para ensaios que exijam a moldagem de corpos-de-prova, assim como se faz necessário adaptar ou criar ensaios que possam avaliar a consistência, e a partir desta avaliar a trabalhabilidade do material sob as óticas de transporte e facilidade do uso dos equipamentos de compactação.

Após a escolha dos materiais, esquema de fornecimento e estocagem, é necessário executar processo de determinação da dosagem e a criação de processo de controle da qualidade adequado ao processo executivo e compatível com a responsabilidade envolvida. Quanto ao

processo executivo, atividades periféricas à concretagem do maciço devem ser analisadas com cuidado, minimizando-se sua interferência na velocidade e automação do processo e garantindo as propriedades especificadas para o material. Atividades que criam dificuldades no processo são, sem se limitar, a execução das faces de montante, execução de juntas e colocação de vedajuntas, galerias e cortinas de drenagem.

2.4.2.1 Dosagem e estudos Prévios de Laboratório

Todo processo de tecnologia de materiais envolvendo o concreto passa inicialmente pela escolha dos materiais que o comporão. Os materiais são basicamente os mesmos componentes do concreto convencional, necessitando de processos de caracterização já conhecidos. Em obras de grande porte, como já foi mencionado, a adaptação e escolha de materiais dependem da geologia regional, da disponibilidade e do custo de transporte dos componentes. A lógica de utilização é totalmente similar à usada em concreto massa e aqui se discutirá somente os processo de obtenção das misturas.

Identicamente a dosagem de concreto convencional, a definição de traços de CCR segue os três princípios básicos: satisfação dos parâmetros mecânicos especificados pelo projeto, trabalhabilidade compatível com os processos executivos utilizados e obtenção da mistura mais econômica possível, observados os dois fatores anteriores. Simultaneamente às condicionantes mencionadas é analisada a durabilidade da estrutura e são minimizados os efeitos das variações de volumes autogênicas do concreto. Definidos os conceitos de ataque ao problema, sempre cabe ao engenheiro a determinação de modelos simplificados que venham a caracterizar e permitir a análise da realidade objetiva do campo.

Apesar do consumo relativamente baixo de aglomerante utilizado nas barragens de CCR (PACELLI DE ANDRADE et al., 1997; GRAÇA et al., 2003; GRAÇA et al. 2003b), a execução de volumes expressivos em intervalos de tempo relativamente curtos exige cuidados com relação aos efeitos termogênicos presentes na hidratação do cimento, sendo importante a execução de todos os ensaios prévios utilizados no desenvolvimento de soluções com concreto massa.

2.4.2.2 Ensaios para avaliação da Trabalhabilidade

Trabalhabilidade é um conceito relacionado com a capacidade da execução do concreto, evitando-se sua segregação, e obtendo-se o adensamento adequado, de modo a otimizar a velocidade de lançamento, e fornecendo condições de se obter as resistências e demais propriedades mecânicas especificadas. Todo o ciclo construtivo deve ser englobado neste conceito, e o concreto deve ser trabalhável nas fases de mistura, transporte, colocação e adensamento. Pela multiplicidade de métodos utilizados nestas tarefas e pela enorme quantidade de fatores envolvidos, a consistência do concreto foi correlacionada com a trabalhabilidade, completando-se este conceito com o fechamento e integridade da mistura. No caso do CCR, as misturas muito secas limitam a possibilidade de medir a consistência, e correlações envolvendo a compactação via rolo compactador são desejáveis.

Para medida da consistência e conseqüente obtenção de parâmetros para avaliação da trabalhabilidade é utilizado normalmente o processo de Vebe com mesa vibratória, adaptado por Cannon, que definiu como parâmetro de medida o tempo necessário à constatação visual do preenchimento dos vazios pela argamassa com o concreto moldado inicialmente na totalidade do cilindro de ensaio; e o processo de Vebe modificado, com utilização de peso junto com a compactação. O primeiro tem apresentado vantagens, e hoje é largamente empregado no Brasil. Chama-se tempo de Cannon (*Cannon Time*) o intervalo de tempo decorrido do início da vibração até aquele em que a argamassa ocupe todos os vazios da mistura, sendo que este ensaio será descrito no Capítulo 3. A Figura 2.18 mostra o equipamento desenvolvido no LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná, onde o recipiente é transparente, facilitando a visualização do processo de preenchimento de vazios.



FIGURA 2.18 Aparelho Vebe Modificado

O tempo de Cannon (*Cannon time*) é diretamente influenciado pela quantidade de água da mistura e pela quantidade de finos adequada ao preenchimento dos vazios. Procura-se para cada mistura, correlação entre o resultado dos ensaios e a trabalhabilidade necessária à compactação adequada no campo. A trabalhabilidade, no caso é representada pela possibilidade de espalhamento e de passagem do rolo, bem como pela capacidade de se obter a compactação que minimize vazios. Durante a dosagem, baseados na experiência anterior e na caracterização dos materiais, procura-se determinar correlação entre este modelo simples de laboratório com a condição real do campo.

2.4.2.3 *Ensaio para a Avaliação da Resistência aos Esforços Mecânicos*

A resistência aos esforços mecânicos de concretos convencionais é geralmente obtida através de correlações com a resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Em edificações, onde a resistência à tração do concreto não é muito significativa, traz benefícios de simplicidade e permite análises estruturais adequadas. No caso de obras de grande porte também é clara a correlação das propriedades mecânicas (PACELLI DE ANDRADE et al., 1997) com a resistência à compressão, porém a hipótese de se desconsiderar na resistência à tração do concreto passa a ser extremamente conservadora e conceitualmente incorreta.

A determinação da resistência do concreto é o resultado da análise estatística da ruptura dos corpos-de-prova em ensaios simples. No caso da resistência à compressão, são utilizados resultados de ensaios à compressão simples, cujos fatores relevantes em termos de taxa de aplicação da carga, condições de contorno geométricas e de transferência de cargas normalizadas. Mesmo o corpo-de-prova apresentando condições de manuseio, compactação e cura totalmente diferentes das de campo, sua interpretação é possível graças a tratamento estatístico-probabilístico da Teoria da Segurança. Para moldagem do corpo-de-prova, são utilizadas várias técnicas, como a compactação via martelo pneumático ou a utilização de compactação em mesa vibratória, conforme mostrado na Figura 2.19.



FIGURA 2.19 Moldagem e Compactação em Mesa Vibratória de Corpos-de-prova de CCR

No caso do CCR, algumas considerações devem ser feitas quanto à interpretação e execução do ensaio:

- Obras de grande porte têm, por questões econômicas e de minimização dos efeitos da hidratação, dimensões máximas características de agregados elevadas, o que requer corpos-de-prova maiores que os convencionais e apresentando dificuldade de manuseio. Uma alternativa é a execução de corpos-de-prova peneirados, removendo as partículas com tamanho incompatível com o corpo-de-prova, e obtendo correções através de correlações baseadas em ensaios.
- A utilização de material mais seco que o concreto convencional dificulta a compactação dos corpos-de-prova com os meios convencionais de obra, os quais não simulam adequadamente as condições de campo. Um aumento da porosidade de 2% pode significar 10% de perda da resistência à compressão, o que traria grande impacto em relação ao teor de cimento (NEVILLE, 1982). Também teria grande impacto sobre a resistência índices de variação artificialmente altos gerados pela má compactação. A solução utilizada para obter melhores resultados, e hoje prática comum nas obras de CCR, é a compactação do corpo-de-prova em bancadas vibratórias, com frequência e amplitudes similares àquelas dos ensaios de consistência durante o tempo de Vebe determinado na dosagem. Vários laboratórios e obras utilizaram a compactação com marteletes vibratórios com algum sucesso, porém com maior probabilidade de haver não-conformidades no processo (HANSEN e REINHARDT, 1997)

- Mesmo com os cuidados tomados, devem ser estabelecidas relações entre os resultados do laboratório com os reais do campo.
- As determinações dos parâmetros de deformabilidade, módulo e coeficiente de Poisson, podem ser feitos de maneira análoga ao dos concretos convencionais, porém com as mesmas ressalvas feitas aos ensaios de resistência.
- Ensaios específicos para determinação da resistência a tração têm importância fundamental para as análises estruturais. Podem ser utilizados o Método da Compressão Diametral ou o Método de Tração direta, mostrado na Figura 2.20 (RIBEIRO et al., 1998), que apresenta um dos ensaios em testemunho contendo junta de construção da barragem de CCR da UHE Salto Caxias, no Paraná.
- As ligações entre juntas não possuem ensaios específicos que possam simulá-las nos corpos-de-prova usuais.



FIGURA 2.20 Ensaio de Tração Direta

2.4.3 Abordagens para Estudos de Dosagem

As dosagens de CCR vêm sendo realizadas por várias metodologias diferentes, usando dois conceitos principais. O primeiro utilizando os conceitos já apresentados da tecnologia de concreto, considerando a relação água/cimento como um dos parâmetros básicos e outro, aqui

mencionado para posicionamento histórico, utilizando o que se chama de método de solos, que se baseia na relação massa específica versus teor de água. Apesar destas tendências de análise do problema, está-se trabalhando com concreto e em qualquer caso, procura-se satisfazer as condições básicas de resistência, permeabilidade, durabilidade e trabalhabilidade.

A utilização de CCR em obras de concreto massa deve ser balizada pelas necessidades e especificações características do material ou estrutura resultantes. Qualquer definição, dosagem ou projeto de concreto deve considerar estas condicionantes técnicas, aliadas as necessidades em termos econômico-financeiros e de tempo de construção.

Desde o início de sua aplicação, o CCR foi encarado por duas filosofias distintas. Primeiramente, foram utilizadas soluções baseadas nos conceitos de compactação de materiais soltos, erigidas sobre o conceito de controle do teor de umidade ótimo da mistura, de forma a garantir a compactação que obtivesse a maior massa específica possível, não se garantindo, neste caso, o total preenchimento dos vazios, e, tampouco havia preocupação com os parâmetros de resistência do material, já que os requisitos de resistência em barragens de gravidade são, na maior parte dos casos, muito baixos. Por outro lado, surgiu o procedimento de estudo e desenvolvimento baseado na tecnologia de concreto, utilizando seus princípios básicos. Independentemente desta evolução histórica, é claro que a preocupação na definição das propriedades materiais deve se focar nas necessidades do empreendimento quanto aos quesitos de construção e projeto, bem como garantir a performance especificada. Esta conceituação clara e robusta, desvinculada de qualquer pré-concepção, vem sendo espelhada pelos diversos autores nas publicações mais recentes (PACELLI DE ANDRADE e ANDRIOLO, 1998).

Independentemente da metodologia de desenvolvimento aplicada, os estudos devem se concentrar nos seguintes fatores:

- Concreto fresco: evitar a segregação; adaptar-se às condições climáticas, possuir trabalhabilidade compatível com os equipamentos utilizados e com os tempos inerentes a processo e, não necessitar de ações que possam interferir com as hipóteses e parâmetros de projeto.
- Concreto endurecido: envoltórias e demais parâmetros de resistência adequados aos níveis de solicitações esperados, durabilidade representada por sua estabilidade físico-química quando submetido às condições ambientais durante a vida útil, apresentar propriedades reológicas compatíveis com os modelos utilizados em projeto, ou seja,

fornecer as condições que satisfarão os critérios de utilização e de segurança da peça estrutural.

- Custo e disponibilidade: as soluções e dosagens devem se adaptar aos materiais disponíveis na região do aproveitamento, seu custo de produção e transporte.
- Controle da qualidade: a solução deverá contemplar sistema de controle e garantia da qualidade compatíveis com a responsabilidade da estrutura, utilizando claramente parâmetros identificados com os fenômenos a serem controlados e fornecendo padrões para análise de segurança.
- Monitoramento: possibilidade de verificar o comportamento durante a vida útil, que permita execução de engenharia reversa e a verificação da aderência entre o comportamento do protótipo com os modelos utilizados e identifique mudanças no comportamento ao longo do tempo. Estes dados são preciosos para as análises de segurança e durabilidade durante a vida útil, devendo fornecer ferramenta para a manutenção preventiva.

As soluções sob o ponto de vista de tecnologia de materiais têm duas vertentes principais. A primeira é o CCR propriamente dito, no qual a otimização do projeto em termos de custo e processos é sempre tentada. A outra é o já denominado RCD (Roller Compacted Dam), aplicada principalmente no Japão, cujas restrições das especificações não permitem que se possa usufruir de todas as vantagens do método. Estes princípios geraram cinco filosofias de mistura diferentes:

- CCR Pobre (Lean RCC), com teor de materiais cimentícios baixo, em geral menores que 100 kg/m^3 , sem preocupações especiais com os finos, obtendo-se um material razoavelmente permeável, em geral pouco homogêneo ao longo da espessura da camada, e podendo apresentar caminhos preferenciais de percolação entre as camadas de concretagem. O controle da percolação é obtido pelo emprego de membranas impermeáveis ou de concreto convencional na face de montante. Neste caso, foi utilizado o conceito de material de ligação entre camadas (bedding mixes) que pode ser composto por micro concreto ou por argamassa. Esta última mostra-se mais eficiente em termos de espalhamento e de facilidade executiva (ANDRIOLO, 1998).
- RCD (Roller Compacted Dam), método desenvolvido no Japão com o objetivo de se obter material semelhante àqueles gerados pelo processo convencional de execução de barragens, utilizando concreto mais argamassado e úmido. Neste caso, o teor de

material cimentício é função das especificações técnicas. Este tipo de solução possui critérios de projeto muito conservadores, utilizando-se a compactação via rolo para aumentar a velocidade de construção. Os critérios e especificações, justificados pela sismicidade do país e em critérios rigorosos de durabilidade aos agentes ambientais, exigem o envelopamento do RCD por concreto convencional, e restrições conservadoras quanto à permeabilidade do material, quanto à taxa de colocação do concreto para controlar os efeitos volumétricos da retração e da termogênese gerada pela hidratação do cimento, e quanto ao tamanho dos blocos da barragem. A barragem possui juntas de contração a cada 15 m, que são obtidas através do corte, em geral por placas vibratórias, no concreto logo após a compactação da camada (HANSEN e REINHARDT, 1997; ANDRIOLO, 1998).

- CCR com Alto Teor de Pasta (High Paste RCC), com grande utilização de materiais cimentícios, com teores maiores que 150 kg/m^3 , onde se procura obter coeficientes de permeabilidade do CCR similares àqueles obtidos na execução com concreto convencional. Foi inicialmente proposta no projeto da Barragem de Upper Stillwater, nos Estados Unidos (OLIVERSON e RICHARDSON, 1984; MCTAVISH, 1988). Esta condicionante é gerada pela possibilidade de ocorrência de fissuras na face de montante, em geral construída em CCV. As fissuras podem ocorrer pela aliança dos fenômenos de termogénia do concreto com as ações ambientais, como a variação de temperatura e de umidade do ar, insolação e presença do vento, ou com as variações presentes quando do enchimento do reservatório.
- Concreto com Teor Médio de Argamassa (Medium Paste RCC), com teor de material cimentício entre 100 e 149 kg/m^3 . Esta solução tem desenvolvimento recente e busca aliar os conceitos envolvidos na economia do CCR Pobre com a homogeneidade possível no CCR com Alto Teor de Pasta (DUNSTAN, 1999, 1999a e 2003).
- Concreto Com Alto Teor De Finos (ATF), ou “Método Brasileiro”. A limitação da disponibilidade de cinza volante no Brasil gerou a necessidade de utilização de materiais alternativos. Um país com elevadas variações de temperatura sazonais e mesmo diárias, principalmente nas regiões Sudeste e Sul, requer rigores no controle da temperatura de colocação e da elevação de temperatura pelas reações do cimento. As grandes obras de concreto pressionaram por um grande desenvolvimento do concreto massa, onde as dosagens partiam do pressuposto da minimização do consumo de cimento, mantendo a trabalhabilidade do material. Além das

condicionantes de controle térmico, são também importantes a inibição da reação álcali-agregado e o acerto da quantidade de finos da massa para efeitos de trabalhabilidade e da diminuição da permeabilidade do concreto endurecido, que geraram a utilização intensiva de pozolanas nas obras de concreto convencional. Uma alternativa ao uso da pozolana é a utilização de agregado miúdo pulverizado nas misturas. O primeiro contato de engenheiros brasileiros com esta possibilidade foi no projeto da Barragem de Capanda, em Angola, com a indicação do engenheiro russo Osipov de utilizá-la inicialmente para a inibição da reação álcali agregado (ALMEIDA, 1991; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997). A recomendação indicava que na obra 7% da areia artificial deveria ser composta por partículas passando na peneira nº 100. O procedimento foi discutido no meio técnico nacional e as primeiras análises foram condensadas no trabalho pioneiro de PAULON et al. (1992), desenvolvido nos laboratórios da Usina Hidrelétrica Segredo, da COPEL, no Paraná, que demonstrou as vantagens desta adição sob a ótica da abrasão, durabilidade e econômica. O agregado pulverizado passou a ser largamente empregado por sua capacidade de preenchimento de vazios, possuindo em vários casos alguma capacidade pozolânica e a capacidade de inibição da reação álcali-agregado.

Apesar da existência de vários trabalhos defendendo cada uma das metodologias citadas e exaltando suas vantagens, as soluções para cada problema específico devem ser escolhidas e adaptadas de acordo com as condições locais, tendo sempre como pontos de referência, como já mencionado, a economia, praticidade, satisfação das especificações de projeto e capacidade do controle da qualidade adequado. Qualquer que seja a solução, está-se trabalhando com concreto e com obras com grande responsabilidade sob o ponto de vista de perda de vidas humanas ou de patrimônios elevados, ou seja, os controles e análises da técnica da engenharia devem ser empregados, com sistema de garantia da qualidade seguro e eficiente. De todos os métodos, para qualquer fim específico, além dos pontos normalmente estudados em tecnologia de concreto são particularmente importantes:

- Cuidados com a curva granulométrica, procurando garantir o fechamento dos vazios da mistura, com preocupações com o teor de finos total da massa, que fornecerão condições para a obtenção de uma trabalhabilidade adequada. A inibição da reação álcali-agregado deve ser uma preocupação constante e pode ser obtida pela utilização da parte pulverizada do agregado, desde que comprovada em laboratório, e em

conjunto com o uso de pozolanas. Hoje é impensável a execução de grandes maciços de concreto sem a utilização de pozolana. A medida da permeabilidade do concreto fresco fornece um excelente calibrador para as análises granulométricas, e este ensaio que está sendo pesquisado e desenvolvido no Laboratório de Concreto de FURNAS, mostra resultados bastante promissores para uso comercial efetivo. A Figura 2.21 mostra a execução deste ensaio (VICARI et al., 1998).



FIGURA 2.21 Ensaio de Permeabilidade do Concreto Fresco

- Cuidados com o controle do teor de água em todas as fases executivas, desde a mistura até a compactação final, visando a garantia da trabalhabilidade necessária a esta última fase de modo a se obter o grau de compactação adequado e conseqüentemente as propriedades mecânicas preconizadas nos modelos utilizados.
- Utilização de aditivo retardador para aumentar o intervalo de tempo de trabalhabilidade adequada à compactação.

2.4.4 Controle da Qualidade

No item anterior mostrou-se que o novo método construtivo necessita da formação de todo um arcabouço de ensaios e suas interpretações. Estes devem ser estendidos ao controle da qualidade das obras de CCR, de modo a se obter parâmetros confiáveis que representem o comportamento da construção e as propriedades do produto final. Os mesmos ensaios determinados nos processos de definição da dosagem podem ser aplicados no campo, considerando quantis representativos do processo para que os corpos-de-prova sejam obtidos. A amostragem usual considera a execução de dois corpos-de-prova para cada idade de controle e para cada parâmetro por volume colocado entre 200 e 1000 m³, sendo comum obter-se amostras a cada 500 m³, ou no mínimo uma amostra por turno de trabalho (ANDRIOLO, 1998). Como estes ensaios são potenciais em relação ao protótipo, utiliza-se um plano de extração de testemunhos que venha a confirmar os resultados obtidos nos corpos-de-prova moldados e que forneça dados suficientes para um diagnóstico das condições da obra antes do comissionamento. Neste caso é de fundamental importância a determinação da envoltória de resistência obtida entre os lances de concretagem (camadas), bem como verificar a alteração dos parâmetros de resistência e da porosidade ao longo das camadas.

Além do controle do resultado final em termos de resistência, dados que permitam a correção do processo industrial antes da compactação são muito importantes. Misturar materiais muito secos em grande quantidade é uma tarefa sujeita à segregação e ao erro de dosagem. O CCR adapta-se a vários tipos de central, que serão escolhidas conforme as produções médias e de pico projetadas e das análises econômico-financeiras. Utiliza-se:

- Centrais convencionais, com balanças de pesagem e misturas de quantidades discretas de concreto.
- Centrais contínuas, à imagem de pug-mills, com dosagem feita através de correias transportadoras com células de carga controladas por centrais computadorizadas.

Em qualquer solução, a particularidade de consistência do CCR, com menor consumo de água e alto teor de finos, requer a avaliação contínua do processo de mistura e transporte. Alguns controles são fundamentais no processo:

- Controle do teor de cimento da mistura, que pode ser feito por análise química ou pelo ensaio de determinação do calor de neutralização.

- Controle do teor de água da mistura que pode ser obtido através de secagem a fogo ou pelo DMA, desenvolvido pelo Eng. PACHELI DE ANDRADE no Laboratório de FURNAS, em Goiânia, estado de Goiás, mostrado na Figura 2.22 (ANDRADE et al., 2003), sendo este ensaio descrito no Capítulo 3. Este aparelho trouxe grande avanço ao processo, pois a quantidade de água define os parâmetros de compactação e, por conseguinte, o sucesso do processo. A água estudada na dosagem é necessária à compactação e sua mudança pode gerar porosidade excessiva no terço inferior da camada. O controle da água não deve, portanto, se restringir à saída do misturador, mas ter avaliação ao longo de toda a seqüência executiva.
- Controle da granulometria através do peneiramento do concreto fresco.
- Verificação do assentamento da camada após a passagem de rolos compactadores, para controlar o processo e verificá-lo através da medida da massa específica do produto final logo após a compactação. Esta verificação pode ser feita de maneira simplificada pelo método manual do anel, que apesar de impreciso pode auxiliar no controle do grau de compactação; ou através de métodos sofisticados como o densímetro nuclear, onde a massa específica é medida pela passagem de radiação pela massa fresca (Figura 2.23).
- Utilização de aditivos retardadores para aumentar o tempo de compactação enfrentando as sazonalidades climáticas inerentes ao processo construtivo.



FIGURA 2.22 Dispositivo para Medida do Teor de Água (DMA)



FIGURA 2.23 Densímetro Nuclear

A presença de mão-de-obra qualificada na frente de serviço passa a ser um controle importante das condições da massa e dos resultados da compactação, pois pode detectar segregações ou diferenças dos teores de água ou de material cimentício.

O meio ambiente tem grande influência no teor de umidade do concreto, pois existem perdas durante os processos de transporte e colocação do concreto que dependem da umidade do ar, temperatura ambiente, insolação e do vento. Devido a sensibilidade do processo com relação a umidade da mistura, passa a ser importante o controle desta no momento da compactação, devendo a dosagem levar em conta suas perdas. O tempo entre o lançamento e a compactação também deve ser controlado para evitar o enrijecimento da massa. Para evitar perdas de resistência gerada por uso de correção de água na central, é aconselhável a revisão do traço inicial ou a geração de vários traços para minimizar problemas de compactação. Em regiões com grande variação diária das condições climáticas, como no Sudeste e Sul do Brasil, as mudanças nas condições da mistura se agravam, gerando maiores cuidados com a compactação e eficiência do processo. A utilização de aditivos plastificantes retardadores tem se mostrado muito promissora, permitindo a correção dos desvios de consistência e ainda permitindo em alguns casos diminuição do consumo de cimento (MOSER et al, 1998, ANDRIOLO et al., 1999; MOSER et al., 2003a).

2.4.5 Aspectos Construtivos

Como já discutido anteriormente, a repetição do processo tende a diminuir a dispersão de resultados e as não-conformidades executivas, ou seja a qualidade intrínseca da obra tende a melhorar ao longo do tempo. A Figura 2.24 mostra uma seção transversal típica de uma barragem de CCR, com concreto convencional à montante. Os detalhes visam realçar os diversos problemas executivos presentes que podem levar a mudanças de comportamento das propriedades materiais do corpo. Como em qualquer obra de concreto, as propriedades do material dependem do método construtivo escolhido, e sua influência deve ser avaliada para calibrar o sistema de controle e as análises de segurança.

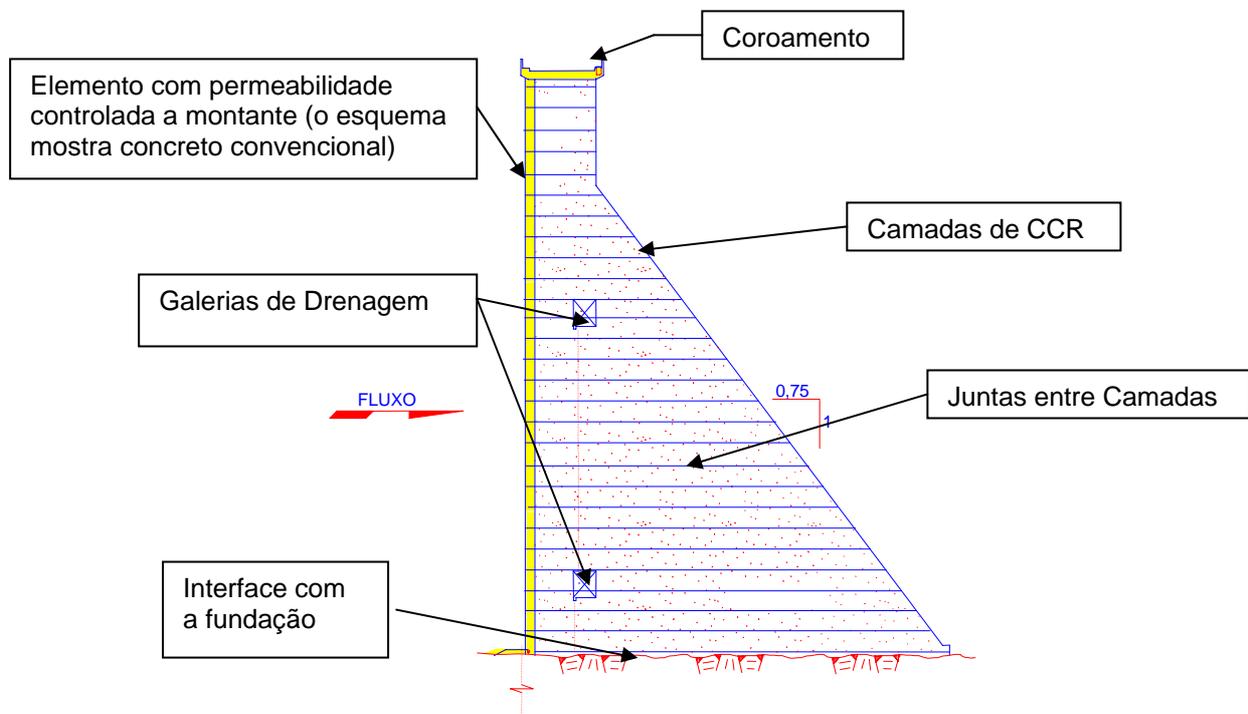


FIGURA 2.24 Seção Transversal Típica de uma Barragem de CCR a Gravidade

Pelo natural panorama de irregularidades apresentados pela fundação, são necessários trabalhos prévios para limpeza, preenchimento de vazios e regularização da superfície para que a mesma possa receber as tarefas de execução do CCR, conforme Figura 2.25, que mostra a execução dos trabalhos prévios nas fundações de Miel I, na Colômbia.



(a) Vista Geral I



(b) Vista Geral II

FIGURA 2.25 Limpeza e Tratamento de Fundações de Miel I

Fonte: Acervo pessoal do Eng. Francisco Rodrigues Andriolo

A Figura 2.17 e Figuras 2.26 a 2.29 mostram uma vista geral da praça de CCR da Barragem de Salto Caxias no Paraná, onde podem ser observadas as fases de transporte, colocação, espalhamento, compactação e cura do concreto. Fica claro no processo que a utilização de agregados com dimensão máxima característica elevada em uma mistura muito seca levam a necessidade de se tomar cuidados com a segregação do concreto, que pode ser facilmente observada Figura 2.35 que mostra a segregação da saia da pilha desmontada do caminhão. No caso da Barragem de Salto Caxias foi utilizada dimensão máxima característica máxima igual a 50 mm.

Pela extensão e pelo tempo necessário ao processo de compactação, os tempos envolvidos passam a ter grande necessidade de controle, e a concatenação de tarefas deve ser extremamente controlada. Não é demais repetir que o tamanho da praça e o tempo necessário ao processo pressionam a perda de umidade da massa, causando mudanças consideráveis na trabalhabilidade da mesma, induzindo a utilização sistemática de aditivos plastificantes retardadores. O controle da perda de umidade e a preservação da trabalhabilidade para garantia de compactação adequada é uma das chaves para a obtenção de um produto final com as propriedades e grau de homogeneidade adequados.



FIGURA 2.26 Vista Geral da Praça de CCR da UHE Salto Caxias



FIGURA 2.27 Vista Geral de Praça de CCR da UHE Salto Caxias– Em Primeiro Plano Utilização do Densímetro Nuclear



FIGURA 2.28 Visão Geral de Barragem de CCR em Construção – A Montante se vê a Face de Concreto Convencional Utilizando a Técnica de Formas Deslizantes da UHE Salto Caxias



FIGURA 2.29 Detalhe de Espalhamento de Argamassa, Face de Montante e Juntas de Contração

A produtividade da solução em CCR depende da disponibilidade de praça livre para a utilização dos equipamentos com sua máxima eficiência. A execução de galerias, da face de montante, das juntas de construção, drenos de junta, cortinas de drenagem, cortinas de injeção causam interferências que podem dificultar a compactação, e, potencialmente, levar a parâmetros de resistências inferiores ao restante do maciço.



FIGURA 2.30 Detalhe da Praça de CCR de Miel I
Fonte: Acervo pessoal do Eng. Francisco Rodrigues Andriolo



FIGURA 2.31 Detalhe da Praça de CCR da Barragem de Dona Francisca

Na seção transversal típica de uma barragem de CCR, mostrada na Figura 2.24, estão indicados esquematicamente os principais materiais envolvidos. A Figura 2.30 mostra uma camada sendo compactada na Barragem de Miel I, com uso intensivo de esteiras transportadoras

e a Figura 2.31 uma camada da barragem da UHE Dona Francisca com transporte basicamente por equipamento rodoviário, onde pode ser percebido:

- O processo gera uma grande quantidade de interfaces subhorizontais entre as diversas camadas de compactação que podem indicar uma descontinuidade em relação aos parâmetros de resistência ou criar caminhos preferenciais de percolação.
- O grau de compactação é um parâmetro muito importante, pois pode ser correlacionado com o total de vazios da massa. Como em qualquer processo de compactação, pode haver variação considerável de compactação ao longo da espessura da camada, com conseqüente variação dos parâmetros de resistência mecânica.
- Caso a energia de compactação não atinja a totalidade da camada, pode-se obter um caminho preferencial de percolação entre elas. O controle da energia de compactação e sua efetividade serão funções do equipamento existente, do processo utilizado, do número de camadas e da dosagem utilizada e efetivamente existente quando do adensamento.
- A ligação entre camadas sofre influência principalmente da compactação, da disponibilidade de material cimentício que garanta a continuidade dos parâmetros, do tempo de lançamento entre camadas, da utilização de argamassa de ligação, da cura da camada anterior e de seu preparo para a concretagem, e do intervalo de tempo decorrido entre a mistura e a compactação. Quanto à compactação, é importante o *Cannon Time* da hora da compactação, sendo fundamental, e merecedor de ser repetido, o controle da água em todas as fases do processo.
- O projeto de barragens de concreto depende das envoltórias de resistência dos materiais em si e de sua interface. Por conseguinte, o estudo da ligação entre camadas é caminho crítico para decisão do processo.

2.4.5.1 Soluções para a Face de Montante

Como nas barragens de concreto convencional, como já discutido anteriormente, para controle da percolação pelo maciço é prevista a utilização de materiais com menor permeabilidade na face de montante, fator imprescindível para manutenção da estanqueidade e da durabilidade da estrutura. Além de várias possibilidades de solução para o material menos

permeável a montante, alternativas para a execução de formas variam, como a utilização de formas temporariamente fixas, utilização de formas deslizantes, pré-moldados de concreto ou a utilização de concreto extrudado (DUNSTAN, 2003). Várias soluções para a face de montante são normalmente utilizadas, sendo as principais descritas a seguir:

- Aplicação de membranas impermeáveis a montante, utilizando placas de PVC, geomembranas de PVC, placas pré-moldadas com material asfáltico, chapas de aço (BALLESTRERO e GARRONE, 1989; GOLIK e ANDRIOLO, 1992; ANGULO et al., 1995; ANDRIOLO e SCHMIDT, 1992; PACELLI DE ANDRADE e ANDRIOLO, 1996; SCUERO e GONTIJO, 1998). A Figura 2.32 mostra a instalação de geomembrana de PVC na face de montante de barragem de Miel I, na Colômbia.



FIGURA 2.32 Instalação de Manta de PVC na Face de Montante de Miel I
Fonte: SANTANA e CASTELL, 2004

- Optando-se pela solução de face em concreto, em geral é utilizado concreto convencional com limite de coeficiente de permeabilidade, ou através, devido à facilidade de se efetuar o controle, da exigência de resistência mínima que possa ser correlacionada com aquele parâmetro. Cria-se, neste caso, uma interface entre materiais com comportamentos diferentes sob o ponto de vista mecânico ao longo do tempo, e com respeito às variações de volume e possibilidade de abertura de fissuras. A face de montante requer uma quantidade grande de mão-de-obra importante e representa um processo braçal interferindo no sistema industrial de alta produtividade.

A dosagem do concreto de face deve considerar as observações colocadas no resumo apresentado sobre concreto massa, minimizando os efeitos da geração de calor autogênica e, por conseguinte, o panorama de fissuração. A utilização de materiais finos para efeito filer e de pozolanas para minimizar o consumo de cimento deve ser considerada, utilizando como parâmetro de controle o coeficiente de permeabilidade e não a resistência mecânica do concreto.

Como alternativa construtiva, a execução desta face pode ser simultânea a execução do CCR, colocando-se concreto convencional na face de montante, conforme mostrado na Figura 2.29 e depois espalhando a praça de CCR até a justaposição com o concreto de face e executando a vibração manual conjunta da região da interface para assegurar uma transição adequada. Este processo simples tem larga utilização e é usualmente conhecido como método da árvore de Natal, pela imagem criada, como mostrado na Figura 2.33. A Figura 2.34 mostra o aspecto final da face de montante de uma barragem construída pelo processo de “árvore de natal”.

A execução posterior da face de montante é possível, como mostrado na Figura 2.28, onde mostra a utilização da técnica de deslizamento de formas na barragem de Salto Caxias, no Paraná. Quando da análise desta solução, deve ser considerada a restrição do maciço de CCR, que pode ser determinante no aparecimento de fissuração de origem térmica.

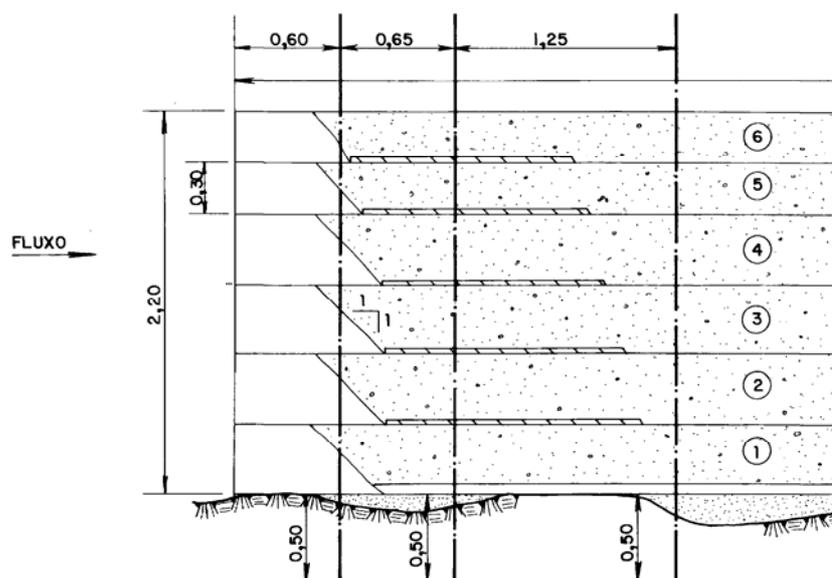


FIGURA 2.33 Detalhe da Face de Montante no Processo da “Árvore de Natal”



FIGURA 2.34 Face de Montante com Processo da “Árvore de Natal” da Barragem da Derivação do Rio Jordão

- A utilização de CCR com menor permeabilidade a montante é uma alternativa já utilizada com certa frequência, principalmente na Espanha e na China.

A Espanha conta hoje com 24 obras de CCR em andamento (ALONSO-FRANCO e JOFRÉ, 2003), todas utilizando o conceito de alto teor de pasta, conforme mostrado no resumo de dados na Tabela 2.7. Foram colocados em torno de 3,6 milhões de m³ de CCR, sendo que na Barragem de Rialb foram utilizados 1,2 milhões de m³. Como aglomerante são utilizadas misturas de cimento Portland com cinza volante sílico-aluminosa.

Nas soluções utilizando somente CCR como material que garante a estanqueidade, as barragens espanholas adotaram dois tipos de solução (ALONSO-FRANCO e JOFRÉ, 2003). No primeiro caso, utilizando zoneamento do lançamento de CCR, considerando concreto com propriedades mais adequadas a montante, com espessura mínima de 3,0 m, menores dimensões características máximas dos agregados para minimizar a segregação, com consumos ligeiramente maiores de aglomerante. Outra solução adota a execução de barragens homogêneas com um só tipo de CCR, que hoje é a tendência técnica atual na Espanha. Com relação às soluções de montante utilizadas nas barragens de CCR na Espanha, do total de 24 barragens executadas, 75% consideram o CCR como material que garante os parâmetros desejados para controle da percolação.

TABELA 2.7 Teores de Aglomerante utilizados em Barragens na Espanha

| PARÂMETRO | MÉDIA | MÁXIMO | MÍNIMO |
|---|-------|--------|--------|
| Cimento Portland – C (kg/m ³) | 78 | 100 | 70 |
| Cinza Volante – F (kg/m ³) | 125 | 170 | 90 |
| C+F (kg/m ³) | 200 | 240 | 185 |
| $\frac{F}{C+F}$ (%) | 63 | 70 | 60 |
| $\frac{A}{C+F}$ | 0,49 | 0,54 | 0,42 |

Onde: A: Consumo de Água
C: Consumo de Cimento
F: Consumo de Cinza volante
Fonte ALONSO-FRANCO e JOFRÉ, 2003

Na China, a utilização de zoneamento do corpo da barragem com CCR menos permeável a montante é, também, prática comum, inclusive com aplicações em barragens em arco. SHEN (2003) relata a presença de 14 barragens utilizando a técnica com alturas máximas entre 36 e 131 m, com consumos de aglomerantes acima dos 150 kg/m³. Tanto nas barragens chinesas quanto nas espanholas, o conceito utilizado para a dosagem foi o de alta pasta, com consumos expressivos de aglomerante.

Uma solução que se encontra em desenvolvimento após os trabalhos desenvolvidos na China na Barragem de Jiangya por FORBES et al. (1999) é a aplicação de pasta ou argamassa sobre o CCR e a posterior compactação por vibradores de imersão enriquecendo o concreto com pasta e argamassa. Este processo denominado de enriquecimento com argamassa do CCR, ou *grout enrichment of RCC*, tem sido aplicado

para melhorar as condições de permeabilidade e de resistência mecânica das faces de montante ou em regiões onde o acabamento pode ser importante. Nesta técnica é lançada uma quantidade limitada de calda de cimento junto ao CCR, calculada para garantir a obtenção de um material com alto grau de homogeneidade, espalhado na face de montante, sendo utilizados na seqüência vibradores convencionais para a compactação desta região. O método tem como vantagem a diminuição da interferência na praça e a simplificação decorrente da utilização de um só tipo de mistura na mesma. Em alguns casos o processo é complementado pela utilização de argamassa na face de montante, com espessura da ordem de 5 mm, de modo a garantir a baixa permeabilidade.

Além das barragens chinesas, o processo foi aplicado na face de montante de MIEL I, que ainda teve aplicada manta de PVC para garantir sua estanqueidade, como já mostrado anteriormente (SANTANA e CASTELL, 2003 e 2004). No Brasil o processo foi testado com o material desta pesquisa para a UHE Dona Francisca em laboratório, e foram executados trechos das paredes das galerias para melhorar o seu acabamento.

2.4.5.2 Juntas de Contração

As juntas de contração representam uma interferência significativa no processo, podendo gerar problemas de produtividade, e defeitos que venham a representar vazamentos do maciço.

Em termos de execução de juntas várias soluções práticas que interferem pouco com a praça são utilizadas. A Figura 2.29 mostra a execução de junta através da aplicação prévia de material que não tenha aderência com o concreto. Neste caso está sendo utilizada manta plástica, colocada previamente envolvendo peça rígida de madeira que é retirada antes da compactação conforme mostrado na seqüência apresentada na Figura 2.35. As soluções podem considerar juntas ao longo de toda a extensão da seção transversal, ou indução da junta aplicando o material em parte da seção e considerando a abertura completada pelo efeito dos fenômenos térmicos do concreto.



(a) Detalhe da Montagem



(b) Confinamento com CCR



(c) Remoção após Compactação

FIGURA 2.35 Execução de Junta de Contração pela Aplicação Prévia de Manta Não Aderente

Outra solução comum utiliza o corte mecânico da junta após a compactação, através de equipamento vibratório. A Figura 2.36 apresenta o corte da junta durante a construção da barragem de Miel I, na Colômbia. No Japão, no processo de construção utilizando RCD, após o corte da junta, são instaladas placas de aço, com a intenção de prevenir o fechamento da junta durante o seguimento da construção (NAGAYAMA e JIKAN, 2003).



(a) Posicionamento para Corte



(b) Detalhe do Corte

FIGURA 2.36 Corte Mecânico de Junta em Miel I

Fonte: Acervo pessoal do Eng. Francisco Rodrigues Andriolo

2.4.5.3 Demais Interferências

Nas soluções utilizando barragens de concreto, várias atividades complementares são obrigatórias e impactam o processo de compactação, ou necessitam de consistências mais fluidas para sua execução. Dentre as muitas atividades, destacam-se a execução de juntas de construção, que podem exigir a aplicação de concreto convencional ou alterações na composição do CCR, a colocação de instrumentação e a execução das cortinas de drenagem.

Galeria e concretos de peças hidráulicas representam outro tipo de interferência que pode gerar problemas para a produtividade do processo industrial e também discontinuidades importantes sob o ponto de vista de comportamento físico, bem como potencialmente estas regiões tornam-se mais suscetíveis a defeitos construtivos. Várias soluções que procuram minimizar as interferências na praça e garantir uma compactação adequada são utilizadas, tais como a utilização de pré-moldados como forma lateral, preenchimento com materiais soltos que serão removidos posteriormente, ou ainda formas convencionais.

Similarmente aos cuidados de construção da face de montante, a jusante podem ser necessários cuidados com a durabilidade, estéticos e no caso de barragens-vertedouro resistência à abrasão e à cavitação. A Figura 2.37 mostra a execução de concreto convencional a jusante da barragem da Derivação do Rio Jordão, utilizando formas deslizantes em superfície com dupla curvatura, e Figura 2.38 mostra a face de jusante da Barragem da UHE Dona Francisca, com vertedouro em degraus executado com concreto convencional.



FIGURA 2.37 Execução da Face de Jusante da Barragem da Derivação do Rio Jordão



FIGURA 2.38 Face de Jusante com Vertedouro em Degraus da UHE Dona Francisca

2.4.6 Dúvidas Conceituais Importantes

Como descrito anteriormente, verifica-se a grande influência dos métodos construtivos e das condições ambientais nas propriedades do produto final. Desde o início do desenvolvimento do CCR, várias dúvidas conceituais foram levantadas, geradas principalmente pela grande quantidade de juntas horizontais.

a) Envoltória de resistência entre camadas

A grande quantidade de juntas subhorizontais de construção somadas a utilização de concreto muito mais seco do que o concreto convencional, com o aspecto de ser pouco argamassado, criou dúvida quanto aos parâmetros de resistência nas interfaces horizontais e se elas constituem um caminho preferencial de percolação.

b) Influência das condições ambientais locais

A utilização de teores de água relativamente baixos, aliados a grande dependência que o CCR tem do grau de compactação, exige um controle rigoroso da água em todo o ciclo

produtivo. As condições de trabalhabilidade variam durante os períodos do dia ou sazonalmente, causando dúvidas mesmo quando da utilização de aditivos plastificantes retardadores.

c) Controle da compactação

Como já mencionado, o grau de compactação influi diretamente nas propriedades mecânicas do concreto. O controle no campo adequado é importante para evitar não conformidades ou retrabalhos.

d) Métodos de impermeabilização

O controle de percolação em barragens de concreto é feito tradicionalmente por proteções na face de montante, que podem ser constituídas por sistemas de membranas ou mantas impermeáveis e/ou concretos com baixa permeabilidade. No CCR, a adoção de um sistema qualquer deve ser pesada sob o ponto de vista de interferência com a praça, e conseqüentemente diminuição da velocidade de colocação, e pelo comportamento mecânico relativo dos dois materiais, já que fissuras geradas por qualquer causa são indesejáveis. Cabe também discutir que a durabilidade final destas peças será função do tratamento adequado das faces de montante, que devem controlar a percolação de água e de outros agentes agressivos ao maciço de concreto.

e) Previsão de propriedades

A necessidade de previsão de propriedades do protótipo é uma característica das obras de concreto, onde os parâmetros mecânicos variam com o tempo e a verificação da resistência do material é feita em intervalos de tempo consideráveis após a execução. Analisou-se que os dados de laboratório são obtidos por ensaios que diferem muito das condições de campo e que o processo construtivo (função dos equipamentos, mão de obra e treinamento) e suas variabilidades têm grande influência nas propriedades do concreto. Estes fatos dificultam as correlações dos ensaios com os parâmetros que se deseja obter no campo.

f) Obtenção de material mais homogêneo

O objetivo de qualquer obra de engenharia é a obtenção de processos confiáveis com pequenas dispersões dos parâmetros procurados, com controle rigoroso das condições que geram

não-conformidades. Ou seja, os programas de controle da qualidade e as análises de segurança baseadas em estudos probabilísticos levam à busca por um material homogêneo. Crescendo a homogeneidade, diminuem as incertezas dos modelos, tanto no que se refere ao comportamento relativo de diferentes materiais quanto as descontinuidades próprias geradas pelo processo construtivo, levando ao projeto de obras mais confiáveis e duráveis. A tendência atual dos projetos que utilizam soluções em CCR é procurar a homogeneidade dentro das características de simplicidade do processo, buscando relações modelo-protótipo mais confiáveis e índices de variação mais baixos. Estas situações levam a economia de cimento e, portanto minimizam os efeitos das variações volumétricas geradas por sua hidratação. A homogeneidade do maciço proporciona, também, menor dependência das condições da face de montante no que se refere à permeabilidade e durabilidade da estrutura.

2.4.7 Previsão de Parâmetros

Fica claro que de maneira similar a outras obras de concreto, a necessidade de previsão de parâmetros no protótipo é fundamental, e fica mais crítica em obras com alta produção. A dificuldade de representação de comportamento de campo pelos ensaios em laboratório, que gera frágeis correlações entre os resultados dos ensaios de laboratório e o ente real, cria a necessidade de pesquisa de ensaios e métodos de análise que permitam o desenvolvimento confiável do material.

Além da dificuldade de adaptabilidade dos ensaios convencionais à realidade do campo, alia-se a grande variabilidade de equipamentos disponíveis no mercado, com eficiências próprias que exigem misturas diferentes para garanti-las.

A necessidade de adaptação aos materiais disponíveis no local da obra faz com que cada empreendimento específico seja único, e as influências do clima local e suas variações ao longo do tempo têm influência significativa nas dosagens, controle da qualidade e acertos de centrais na obra. Todos os fatores mencionados devem ser ponderados durante o processo de escolha da solução a ser adotada para empreendimentos hidráulicos e os estudos de dosagem devem procurar levá-los em conta, prevendo os parâmetros necessários à trabalhabilidade, segurança, durabilidade, manutenção e ao correto desempenho da estrutura durante sua vida útil.

Nas obras de terra, as condições de compactação sempre foram modeladas por ensaios correlacionando a compactação, e conseqüente massa específica, com o grau de umidade do material. As obras de enrocamento seguem ensaios similares para definição granulométrica e os balizam através de maciços experimentais no campo. Estes procuravam obter o grau adequado de compactação com os diversos equipamentos utilizados, determinando, também, a espessura de camada adequada ao local e aos seus materiais disponíveis. Nestes casos, a massa específica passa a ser o parâmetro mais importante de decisão, correlacionando-a com as demais propriedades desejadas.

Apesar das diferenças conceituais importantes no dimensionamento de peças compostas por materiais soltos daquelas construídas por concreto, a idéia de execução de maciços experimentais pode ser perfeitamente estendida às últimas, que no caso pode-se denominá-los por maciços experimentais. A execução do maciço permite uma avaliação do comportamento das propriedades do concreto com as condições e equipamentos locais, constituindo-se de ferramenta de decisão importante em obras de CCR, pavimentando o caminho para a determinação prévia dos parâmetros físicos procurados.

2.4.8 Maciços Experimentais

A execução de maciços experimentais no campo é de fundamental importância para verificação da adaptabilidade dos processos previstos na dosagem e nos estudos de laboratório. Neste tipo de ensaio, são testados as condições e procedimentos executivos reais, utilizando os equipamentos, materiais, centrais de produção e mão-de-obra que efetivamente desenvolverão o empreendimento. Para serem efetivos, os maciços experimentais devem ser executados preferencialmente após as centrais de britagem e de concreto estarem aferidas, e devem permitir que ensaios do concreto resultante possam ser comparados com os resultados obtidos em corpos-de-prova moldados. Como o CCR pode apresentar pequenas resistências nas primeiras idades, a obtenção de testemunhos só é possível em idades avançadas, o que pressiona o cronograma de execução da obra. Além dos estudos do concreto é possível verificar a aderência de armaduras, colocação de vedajuntas, execução de juntas de contração e ensaios para verificação da envoltória de resistência entre o concreto e a rocha da fundação. A Figura 2.39 mostra a confecção do maciço experimental da barragem da UHE Salto Caxias no Paraná, apresentando em primeiro plano a compactação através de equipamento manual junto às formas onde não há possibilidade de utilização dos rolos compactadores.



FIGURA 2.39 Maciço Experimental no Campo da UHE Salto Caxias

A execução de maciços experimentais na obra em época muito posterior aos estudos de dosagem gera insegurança inicial sobre o processo e dificulta o processo de otimização e a confiança no dimensionamento das peças. Uma alternativa para o processo seria a execução de maciços experimentais em laboratório com a finalidade de simular as condições de execução no campo. A técnica foi inicialmente tentada no Japão, com a criação de simulador de compactação, hoje desativado. O Laboratório de FURNAS, em Goiânia, possui um laboratório para execução de corpos-de-prova compactados, com possibilidade de variação da frequência e energia de vibração do rolo, e velocidade de percurso (GALLEGO et al., 1998; MARQUES FILHO et al., 1998; GALLEGO et al., 1999). O equipamento, totalmente informatizado, monitora a compactação da camada e permite a visualização em tempo real das condições de execução do maciço. As Figuras 2.40 e 2.41 mostram detalhes do equipamento para compactação em laboratório, e a Figura 2.42 mostra esquematicamente um corpo-de-prova correspondente a um maciço experimental de laboratório.



FIGURA 2.40 Vista Geral do Equipamento para Compactação em Laboratório

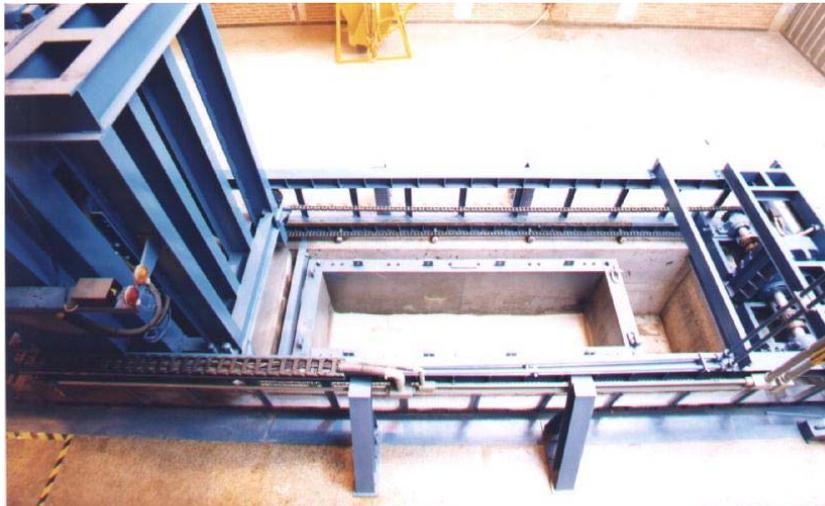
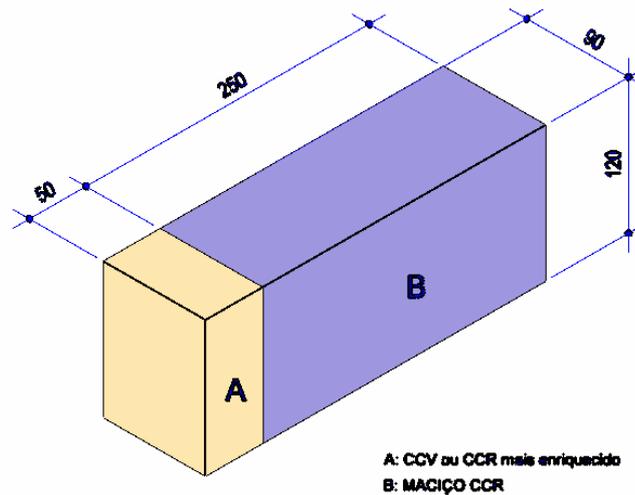


FIGURA 2.41 Vista Superior do Equipamento de Compactação em Laboratório



(medidas em cm)

FIGURA 2.42 Maciço Experimental de Laboratório - Corpo-de-Prova Típico

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

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

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

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

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

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

- Verificação da adaptabilidade dos equipamentos de campo às condições preconizadas nos ensaios de laboratório.
- Avaliação dos processos de controle da qualidade e sua eficiência em condições reais do campo.
- Simulação em real grandeza dos processos que interferem na produtividade industrial, com a execução de faces, colocação de pré-moldados, interfaces com concretos convencionais e chumbadores, avaliação da influência do leito rochoso, entre outros.

- Avaliação de perdas de consistência e teor de água entre a mistura e a colocação.
- Calibragem dos tempos de execução de cada etapa do processo.
- Treinamento das equipes de forma a minimizar os efeitos do noviciado nos primeiros lançamentos. Esta é uma das vantagens mais importantes da pista, pois evita surpresas nas regiões mais solicitadas da estrutura, e fornece um balizamento para correções de procedimentos ou de treinamento das equipes, de modo a minimizar a probabilidade de não conformidades no início da obra.
- O treinamento, aliado ao controle e correção de processos, leva a minimização do índice de variação dos parâmetros controlados no início de obra.
- Obtenção de dados em testemunhos para calibrar os ensaios em corpos-de-prova moldados, complementando os ensaios e correlações obtidas durante os processos de dosagem e de execução de pista em laboratório.

2.4.9 Perspectivas de Futuro e Pesquisa

Observa-se nos últimos anos uma mudança de percepção com relação ao uso do CCR. O material que anteriormente era considerado grosseiro passou a ser encarado como um concreto confiável, possuindo um processo executivo com alta capacidade de colocação industrial. Os sistemas para controle da qualidade mostrando o caminho de menores índices de variação, aliados aos desempenhos iniciais e às pesquisas, levam a um aumento de confiança da comunidade técnica, gerando utilização do processo em obras com responsabilidade crescente. Observam-se como tendências:

- As soluções com maior quantidade de material cimentício têm sido mais adotadas que as mais pobres (ICOLD, 1997; DUNSTAN, 2003), indicando a tendência de obtenção de concreto menos permeáveis e mais duráveis.
- O aumento da confiabilidade dos processos e dos controles da qualidade, com índices de variações baixos, leva a otimização do projeto de barragens, com especificações técnicas de projeto menos conservadoras, e conseqüentemente à diminuição do volume relativo de concreto. A adoção de solução em CCR é adotada em barragens com maiores alturas e responsabilidade estrutural, utilizando-se modelos mais sofisticados.

- Há um aumento na procura por soluções com maior homogeneidade ao longo da espessura da camada, que podem ser obtidas com os teores corretos de finos e de água, e com tratamentos de juntas que garantam a continuidade das propriedades mecânicas e baixas permeabilidades, diminuindo a dependência da impermeabilização da face de montante.
- É importante a pesquisa de processos mais eficientes de controle de permeabilidade da face de montante, sendo notável a técnica de enriquecimento do CCR com calda de cimento ou argamassa, com posterior vibração convencional de imersão, conforme já discutido anteriormente.
- Procura-se, através da pesquisa e de métodos produtivos alternativos, minimizar as juntas frias, cuja consequência possível é a diminuição da probabilidade de existência de caminhos preferenciais de percolação em concretos bem argamassados e adensados, com a consequente diminuição da utilização de argamassa de ligação. Neste sentido está sendo proposto o concreto executado em taludes inclinados com praça limitada, conhecido com concreto rampado, que terá um subitem a seguir para sua descrição.
- Soluções em arco passam a ser mais freqüentes, criando-se processos de tratamento de juntas mais eficientes e econômicos. O desenvolvimento desta solução na China é intenso, conforme mostrado na Tabela 2.1, com consumos de aglomerante superiores a 150 kg/m^3 .
- São necessárias pesquisas com a finalidade de diminuir as incertezas ainda existentes, basicamente de ligação de camadas e sua envoltória de resistência, dos parâmetros que identifiquem as propriedades físicas e sua previsão, do controle do processo em todas suas fases, na melhoria das metodologias de dosagem e a utilização de aditivos redutores de água e retardadores de pega e adições.

2.4.9.1 Barragens em arco

Como já discutido anteriormente, as barragens em arco são uma evolução natural das barragens em concreto a gravidade sendo compostas por estruturas curvadas em que os carregamentos são transferidos, por efeito arco, ao perímetro, ao invés de principalmente na

vertical como no modelo a gravidade. A Figura 2.43 mostra a barragem em arco de Puding, na China.



FIGURA 2.43 Vista de jusante da Barragem de Puding, China.

As primeiras tentativas de economia de material utilizando modelos de arco-gravidade e arco já estão em andamento, principalmente na China e na África do Sul.

O emprego do CCR nas soluções em arco tem como desafios:

- Juntas de contração e seu sistema de injeção
- Execução de formas em curva
- Homogeneidade do material
- Interferência com sistemas de drenagem e instrumentação
- Impermeabilização da face de montante

O *Department of Water Affairs and Forestry* da África do Sul projetou e construiu as primeiras estruturas em arco em CCR do mundo. Duas barragens de arco-gravidade foram executadas em CCR, a primeira Knellpoort, com 50 m de altura, terminada em 1988; e a barragem de Wolwedans, com 70 m de altura, terminada em 1989 (GERINGER, 1995 e 1995a; SHAW, 2003).

Neste tipo de solução estrutural há a necessidade de comportamento monolítico da barragem, gerando a necessidade de tratamentos sofisticados de juntas, que devem adaptar a velocidade das obras de CCR, minimizando as interferências com a praça de trabalho. Os

tratamentos de juntas devem permitir os obrigatórios planos de injeção durante a execução e até após o início da operação, através de sistemas seguros e confiáveis, de modo a garantir a segurança deste tipo de estrutura. Pelo processo construtivo, as formas mais elegantes dos arcos de dupla curvatura têm dificuldade de serem adotadas, gerando a necessidade de adaptação dos processos de projeto existentes (SHAW, 2003).

As barragens em arco são muito deformáveis e seu comportamento é grandemente influenciado pelos parâmetros de deformabilidade das fundações. A solução apresenta modelos estruturais complexos, e nos estudos de segurança aos estados limites últimos de estabilidade global ou de suas seções mostram tensões relativamente altas, necessitando, portanto ser garantidos parâmetros para as envoltórias de resistência elevados e confiáveis.

A execução das barragens em arco reforça a necessidade da cultura do controle e monitoramento constante de processos, através da qual passam a ser ainda mais importantes os detalhes de qualidade, onde os cuidados com a produção em larga escala devem estar sempre em conjunto com a necessidade de manutenção dos parâmetros dentro das especificações de projeto, minimizando discontinuidades e defeitos. O controle da qualidade começa na fase de investigação geotécnica e ultrapassa o final da concretagem, já que este tipo de solução necessita de monitoramento constante e verificação do estado das juntas e dos diversos drenos e instrumentos.

Apesar das barragens em arco executadas com concreto convencional terem poucas falhas percentuais se comparadas com outros tipos de barragens, comparando àquelas que utilizam concreto convencional, eventuais problemas têm difícil e custosa solução. O modelo mecânico utilizado pode levar a ruínas sem aviso, que podem ser catastróficas.

2.4.9.2 *Soluções da face de montante*

Como visto anteriormente, várias soluções são adotadas para controle da percolação pela face de montante das barragens de CCR. Muitas já haviam sido adotadas usualmente em obras hidráulicas de concreto convencional, sendo bastante conhecidas. Dentre os processos descritos, destacam-se pela inovação e necessidade de pesquisas mais específicas a utilização de zoneamento da barragem utilizando CCR com permeabilidade menor contra formas, e o enriquecimento do CCR por pasta ou argamassa.

A utilização de CCR para a execução da face ainda não está disseminada no país, necessitando de pesquisas nos processos de dosagem, controlando sua permeabilidade, por exemplo, através do correto proporcionamento de finos e água, além de avaliar cuidadosamente o tratamento das juntas entre camadas. Estudos para determinação de parâmetros de controle que assegurem a permeabilidade especificada, bem com a análise de falhas potenciais devem ser executados no campo, com instrumentação adequada à obtenção de dados confiáveis.

O enriquecimento do CCR com calda de cimento ainda não possui banco de dados disponível para sua aplicação confiável, apesar do uso em algumas barragens na China, como na barragem de Jiangya, conforme descrito no trabalho de FORBES et al., em 1999. No Brasil este método foi testado no maciço experimental em laboratório da Usina de Dona Francisca com sucesso, e na face de jusante da galeria de drenagem no campo com resultados estéticos excelentes. Para utilização em larga escala em obras são indispensáveis análises exaustivas em laboratório e testes em larga escala no campo em peças secundárias. Estas pesquisas devem procurar caracterizar as propriedades mecânicas do concreto alterado pelo enriquecimento, e avaliar a possibilidade de aplicação no campo com confiabilidade. A aplicação ao CCR com alto teor de finos deve ser cuidadosamente avaliada, pois há pouca pesquisa disponível.

2.4.9.3 *Concreto Rampado ou Método Chinês*

Durante as discussões e apresentações do penúltimo congresso internacional de barragens de concreto compactado com rolo (*International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams*), ocorrido na China em 1999, foi lançada uma técnica alternativa notável para execução do CCR. Nesta proposta, diminui-se a área de espalhamento e compactação, subindo a barragem entre as juntas de contração, permitindo o lançamento de camadas discretas de pequeno volume constantemente. As camadas são colocadas com pequena inclinação com relação à horizontal de modo a permitir o acesso do rolo, podendo a superfície ser retomada para a próxima camada em um intervalo de tempo relativamente curto. O programa de lançamento, com tempo reduzido entre camadas sucessivas, diminui, e até pode evitar, a necessidade de utilização de argamassa de ligação. O processo reconstitui basicamente as condições básicas das barragens com concreto massa no que se refere às alturas entre camadas, com menor número de juntas frias, e com juntas de contração bem definidas. As Figuras 2.44 e 2.45 apresentam o processo, ajudando a interpretação da descrição.

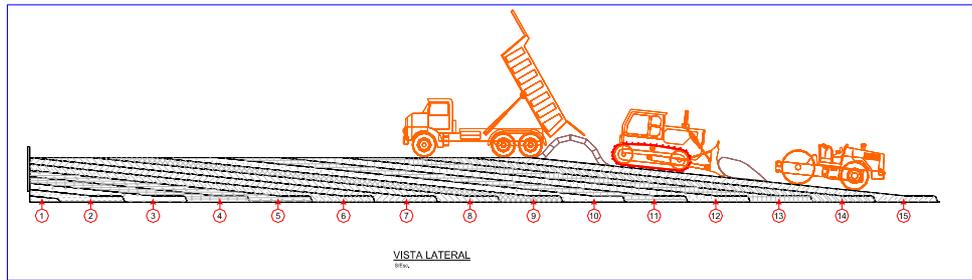


FIGURA 2.44 Vista Lateral do Processo do CCR Rampado

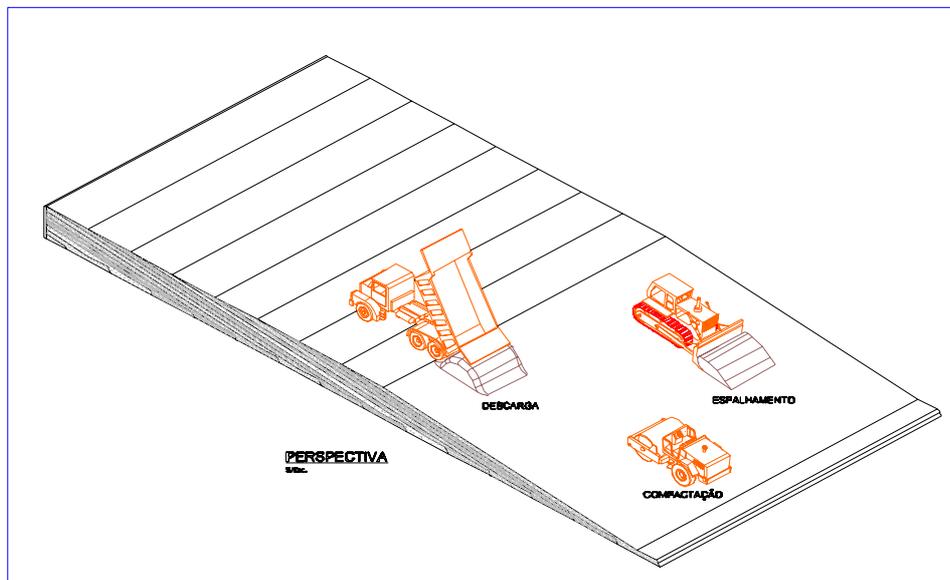


FIGURA 2.45 Perspectiva do Método Chinês Rampado

Além das vantagens citadas, a colocação em camadas sucessivas permite uma distribuição mais homogênea dos volumes colocados de concreto, otimizando a utilização dos equipamentos, podendo gerar condições de maiores produções médias.

O processo é promissor, e seus primeiros resultados mostram que o material resultante são totalmente similares aos do sistema usual de aplicação do CCR (FORBES et al., 1999; DU e MA, 1999; JIANG et al., 1999; CHONGGANG, 2003), e sua aplicação no Brasil começou na Usina de Lajeado mostrada na Figura 2.46, e tem seqüência através da adaptação do processo utilizada nas barragens de CCR das UHE Santa Clara e UHE Fundão, no rio Jordão, estado do Paraná.



FIGURA 2.46 Aplicação do CCR Rampado na UHE Lajeado

Neste processo são fundamentais pesquisas que estudem os parâmetros de resistência da interface entre camadas, visando a obtenção de critérios seguros para a colocação de argamassa de ligação.

Apesar das vantagens em termos de produção e dimensionamento das facilidades industriais, a técnica pode dificultar a execução dos taludes de jusante de barragens-vertedouro em degraus, como a barragem de Santa Clara, cuja vista de jusante está apresentada na Figura 2.47. A dificuldade se apresenta pela obtenção natural de degraus de CCR inclinados no processo. Em função desta dificuldade, nesta barragem adaptou-se a técnica do concreto rampado, mantendo as camadas subhorizontais, mas diminuindo a colocação de argamassa de ligação pelo controle do intervalo de tempo entre camadas sucessivas. O processo, apesar de econômico apresenta dificuldades na colocação do concreto convencional a montante quando da utilização do método da “árvore de Natal” no caso de intervalos de tempo longos para início da vibração. São necessários intensos estudos sobre a colocação de aditivos e sobre os processo executivos para a garantia de adensamento adequado do concreto convencional.



FIGURA 2.47 Face de Jusante da Barragem da UHE Santa Clara

2.4.9.4 *Novas tecnologias para avaliação da necessidade de preparação de camada*

Para avaliação da necessidade de preparação da camada para garantir os parâmetros de resistência e evitar caminhos preferenciais de percolação, outra linha de pesquisa muito promissora é a aplicação de ultra-som na determinação dos tempos de pega e no endurecimento no concreto. Procura-se determinar correlação entre a velocidade de pulso de ultra-som na camada de base com seus parâmetros físicos e com aqueles que caracterizam a junta. Ribeiro et al., em 2003, apresentaram resultados realizados em CCR com alto teor de aglomerante, procurando estabelecer correlações entre a velocidade de pulso ultra-sônico com a resistência à tração direta. A pesquisa avalia a perda de trabalhabilidade com o tempo através de resultados de determinação da velocidade de pulso de ultra-som, testes de resistência à penetração e de ensaios de VeBe modificado (RIBEIRO et al., 2003); correlacionando estes parâmetros com a resistência à tração direta em corpos-de-prova cilíndricos de 15cm x 30cm, executados em duas camadas de 15cm moldadas com intervalos de tempo determinados. A Tabela 2.8 indica o traço do concreto utilizado na pesquisa, cujos resultados relevantes mostram coerência com a perda de trabalhabilidade medida pelos ensaios de penetração e de Vebe modificado. A velocidade de pulso de ultra-som aumenta com a quantidade de sólidos da amostra. A medição de sua variação ao longo do tempo, iniciando no concreto fresco recém misturado, permite a avaliação dos

processos de pega e início do endurecimento, quando as reações de hidratação começam a formação de um sólido coerente. Os resultados da pesquisa mostram velocidades baixas e constantes até quatro horas após a moldagem, aumentando praticamente linearmente até oito horas. Em contrapartida, os ensaios de tração direta mostram que a resistência de corpos-de-prova a tração direta executados em duas camadas são praticamente constantes para até 6 horas de intervalo de moldagem.

TABELA 2.8 Dosagem do concreto utilizado na pesquisa de Ribeiro et al., 2003

| MATERIAL | UNIDADE | PARÂMETRO |
|--|-------------------|-----------|
| Agregado graúdo (Xisto) 19 – 38 mm | kg/m ³ | 530 |
| Agregado graúdo (Xisto) 10 – 19 mm | kg/m ³ | 257 |
| Agregado graúdo (Xisto) 5 – 10 mm | kg/m ³ | 774 |
| Agregado miúdo | kg/m ³ | 701 |
| Cimento CEM IV 32.5 | kg/m ³ | 130 |
| Cinzas volantes com (42,1% SiO ₂ reativo) | kg/m ³ | 60 |
| Água | l/m ³ | 130 |
| Relação água/alomerante | - | 0,68 |
| Vebe modificado (massa de 23 kg) | S | 15-20 |
| Resistência média à compressão aos 28 dias | MPa | 13,2 |

3 ENSAIOS ESPECÍFICOS E ESPECIAIS PARA BARRAGENS DE CCR

A Normalização Brasileira específica para o projeto, construção, operação e manutenção de barragens de concreto não abrange a necessidade para o desenvolvimento das atividades necessárias a estas obras. Nas lacunas existentes, utiliza-se normalizações e recomendações internacionais ou de organizações com notória especialização neste tipo de empreendimento.

3.1 ENSAIO PARA MEDIDA DE PERMEABILIDADE

As Figuras 3.1 e 3.2 mostram o equipamento para ensaio de permeabilidade descrito pelo *United States Bureau of Reclamation*. O equipamento composto por um reservatório de água capaz de alimentar o sistema sem interrupções, e um sistema que mantenha a pressão constante na água que percolará pelo corpo-de-prova selado de concreto. Na lateral do reservatório é fixado um tubo de vidro com escala em papel milimetrado no fundo, com o princípio de vasos comunicantes. Desta forma é possível medir a leitura do desnível da água no reservatório devido à percolação do líquido pelo corpo-de-prova.



FIGURA 3.1 Equipamento para Ensaios de Permeabilidade à Água

As campânulas são projetadas de forma a suportar no mínimo 400 kPa de pressão, permitindo que o líquido que entra pelo topo da campânula percole pela superfície exposta do corpo-de-prova, passando por dentro do mesmo até a base. Um importante aspecto é que o diâmetro interno das campânulas deve ter uma folga de no mínimo 12,5 mm em relação ao diâmetro do corpo-de-prova para a colocação do composto de vedação. No fundo da campânula

existe uma saliência para a fixação do corpo-de-prova para prevenir o vazamento do composto selante quando submetido a pressão. No contato entre a parte inferior da tampa da campânula, deve ser colocado um anel de borracha de 2 mm de espessura para a vedação entre a tampa e a campânula. A fonte de pressão deve ser garantida por meio de uma garrafa de ar comprimido, oxigênio ou nitrogênio gasoso, que deve ser capaz de fornecer a pressão necessária para as especificações do ensaio. No caso do aparelho usado durante os ensaios desta tese, o fornecimento de pressão foi garantido por um tubo de nitrogênio gasoso.

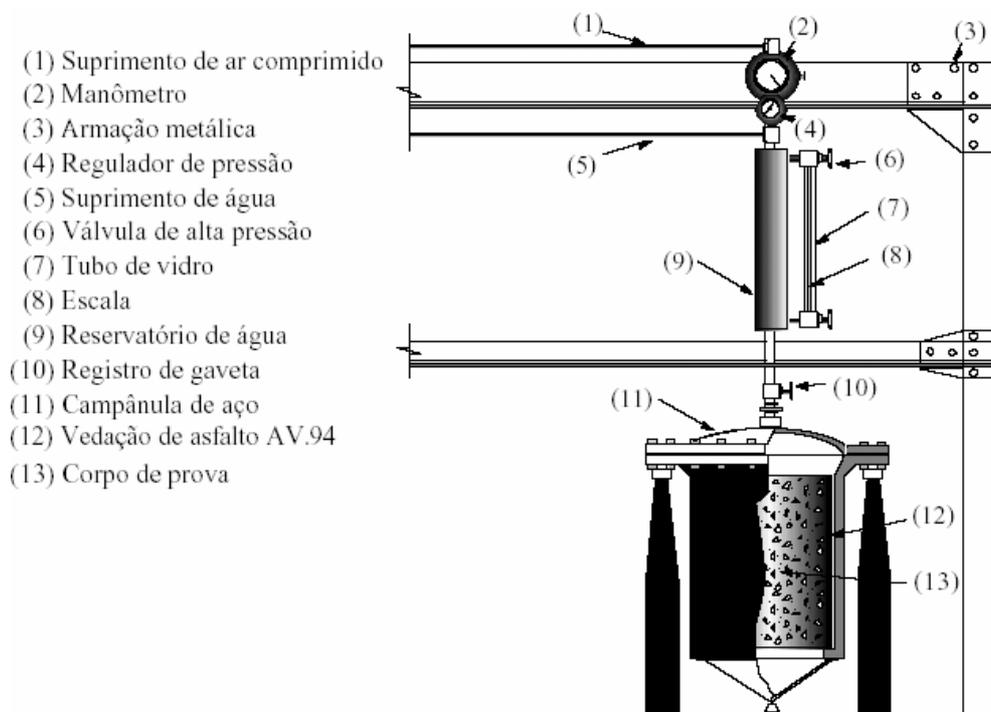


FIGURA 3.2 Representação Esquemática de Equipamento para Ensaio de Permeabilidade
 Fonte: PACELLI et al. (1997)

O cálculo do coeficiente de permeabilidade é feito utilizando a expressão abaixo:

$$k = \frac{Q \times L}{A_b \times H} \quad (3.1)$$

Onde:

k : Coeficiente de permeabilidade

Q : Vazão de entrada

L : Altura do corpo-de-prova

A_b : Área da face do corpo-de-prova

\underline{H} : Altura da coluna de água correspondente à pressão

Para o cálculo de Q , deve-se traçar um gráfico do tempo x percolação onde Q será o coeficiente angular da reta traçada a partir da estabilização do fluxo de percolação. Segundo o procedimento adotado, é usual adotar o valor angular correspondente à reta tangente no tempo de 400 h de ensaio.

O cálculo de \underline{H} é feito utilizando a expressão abaixo:

$$\underline{H} = \frac{\rho}{\gamma} \quad (3.2)$$

Onde:

ρ = Pressão aplicada no ensaio

γ = Peso específico da água

O coeficiente de permeabilidade calculado pela Equação (3.1) deve ser corrigido em função da idade, no caso de corpo-de-prova de concreto, e de sua dimensão quando esta for diferente de 300 x 300 mm.

3.2 MASSA UNITÁRIA DO CCR COMPACTADO ATRAVÉS DO APARELHO DE VEBE E *CANNON TIME*

No Brasil, os ensaios para verificação da trabalhabilidade mais utilizados se baseiam no ensaio de Vebe modificado em mesa vibratória. Nestes ensaios, procura-se verificar o preenchimento dos vazios do concreto quando da aplicação de energia de vibração. A Figura 3.3 mostra o ensaio para determinação do *Cannon Time*, em aparelho de acrílico transparente desenvolvido pelo Eng. Ruy Dikram Steffen no Laboratório de Materiais e Estruturas, LAME, onde se pode verificar facilmente o real preenchimento dos vazios (PACELLI DE ANDRADE, 1996).

Quando da determinação do *Cannon Time*, é necessário preencher, com o concreto fresco, um recipiente de acrílico de volume conhecido e determinar o intervalo de tempo decorrido entre o acionamento da mesa vibratória e a formação da película de argamassa nas bordas do recipiente. O recipiente tem a mesma forma interna e a mesma mesa vibratória do consistômetro de Vebe, com volume igual a 9,2 litros, correspondendo a um cilindro com diâmetro igual a 24,2 cm. A presença da argamassa visível em toda a superfície aparente mostra o preenchimento dos vazios do concreto, sendo um indicativo de sua compactação.

A massa unitária é determinada logo após os ensaios de trabalhabilidade, fazendo-se a razão entre a massa do concreto fresco compactado e seu volume. O ensaio é realizado utilizando-se o recipiente do consistômetro Vebe. Após a medida da massa do concreto recém adensado, preenche-se o vazio com água até seu preenchimento total e determina-se novamente a massa do recipiente. A diferença entre estas medidas representa a massa da água inserida, com a qual facilmente se determina o volume de água adicionado. Conhecendo-se o volume e a massa do recipiente vazio, obtém-se o volume e o peso ocupado pelo concreto após o adensamento com mesa vibratória, e como consequência determina-se sua massa unitária compactada.

A Figura 3.4 mostra a fase de medição da massa do recipiente com o preenchimento do vazio superior com água, onde pode ser observada o filme plástico utilizado para aumentar a precisão e evitar erros durante o manuseio.



(a) Preenchimento do recipiente



(b) Arrasamento do Topo



(c) Colocação na Mesa Vibratória



(d) Vazios preenchidos

FIGURA 3.3 Sequência de Tarefas para Determinação do *Cannon Time*

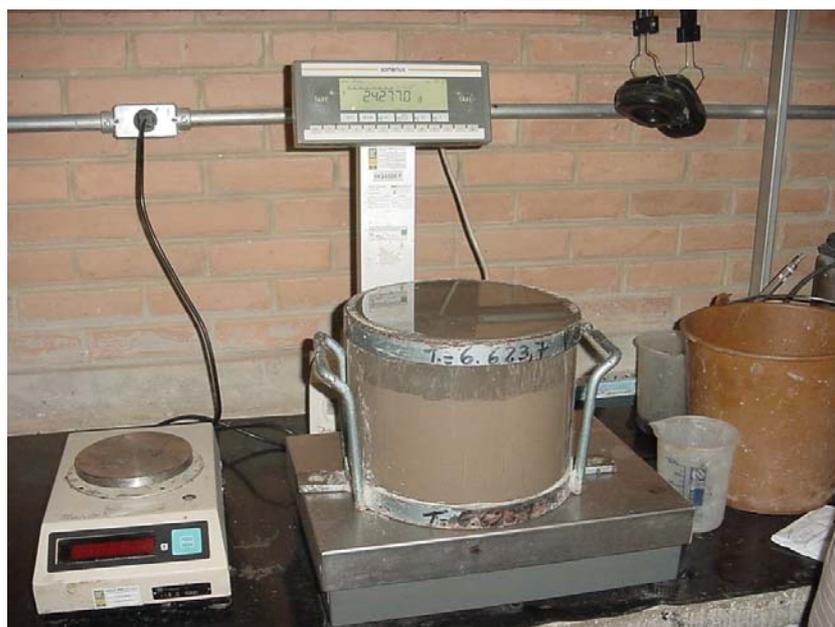


FIGURA 3.4 Determinação da Massa Unitária Compactada

3.3 MASSA UNITÁRIA E TEOR DE ÁGUA UNITÁRIA ATRAVÉS DO APARELHO DE DMA

O aparelho DMA é um dispositivo cilíndrico de acrílico, provido de um sifão, cujo volume de água até este nível é conhecido, denominado volume de equilíbrio. Este equipamento permite a medição da massa unitária teórica do CCR e da água unitária na mistura (ANDRADE et al., 2003).

A Figura 3.5 mostra a execução do ensaio utilizando o aparelho DMA com a amostra de CCR. Após a seqüência de atividades, conhecendo-se a massa da água e o volume de equilíbrio, calcula-se o volume da amostra de concreto, cuja massa foi anteriormente determinada, como mostrado nesta Figura, permitindo a obtenção da massa unitária do CCR. Através de curvas de calibração (Massa Unitária \times Água Unitária, Massa Unitária \times Massa Específica Teórica, Massa Unitária \times Umidade Teórica) para cada dosagem a ser utilizada obtém-se o teor de água unitária. Estas curvas serão definidas a partir de ensaios em que se mantêm constantes o consumo de cimento e o teor de areia do CCR, variando o consumo de água.

Este ensaio é de simples execução não necessitando de nenhum equipamento especial, podendo ser utilizado com precisão na obra. Como é importante o controle rigoroso do teor de umidade do CCR, a utilização do DMA nas várias fases da execução fornece uma ferramenta importante para o controle de qualidade do campo (ANDRADE et al., 2003; GRAÇA et al., 2003b).



(a) Colocação de Amostra no DMA



(b) Determinação do Peso da Amostra



(c) Preenchimento com água



(d) Drenando até o Sifão

FIGURA 3.5 Ensaio com DMA

3.4 PERMEABILIDADE DO CONCRETO FRESCO

A permeabilidade é a propriedade que permite a passagem de um fluido através de sólidos. A sua determinação no estado fresco, possibilita uma análise prévia do comportamento de misturas de concreto, analisando o fechamento do esqueleto granular, fornecendo um parâmetro auxiliar à dosagem e ao controle de campo (VICARI et al., 1998).

O método de ensaio foi desenvolvido pelo Laboratório de Concreto de FURNAS Centrais Elétricas S.A., e é uma adaptação do ensaio de permeabilidade em solos (ABGE, 1996). A Figura 3.6 mostra a execução do corpo-de-prova e o permeâmetro de carga variável utilizado no ensaio.

Os passos para execução do ensaio incluem a moldagem e adensamento de corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 15,4 cm de diâmetro por 17,6 cm de altura; instalação do corpo-de-prova no conjunto de equipamentos que forma o permeâmetro; saturação da amostra de

concreto e medição dos tempos necessários para a percolação de volumes pré-determinados de água.



(a) Corpo-de-prova moldado



(b) Ensaio em Andamento

FIGURA 3.6 Ensaio de Permeabilidade do Concreto Fresco. Moldagem do Corpo-de-prova e Ensaio em Execução

3.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Como já discutido, a preocupação com os parâmetros de resistência das juntas entre camadas acompanha o CCR desde sua proposição. O ensaio de tração por compressão diametral é um ensaio já sedimentado no meio técnico, e por si só não apresenta nenhuma novidade técnica. Foi desenvolvido pelo Eng^o Lobo Carneiro e é conhecido mundialmente como “Método Brasileiro”.

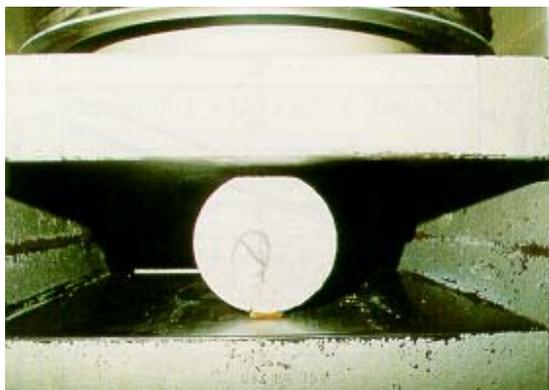
A execução de pistas experimentais permite a obtenção de testemunhos com geratriz paralela ao plano da junta, permitindo que seja ensaiada a junta entre camadas e determinada sua resistência à tração pelo ensaio de compressão diametral. Este fato é de execução relativamente simples em maciços experimentais no laboratório, porém de difícil execução na obra, sendo

possível somente nas regiões junto às fundações. A Figura 3.7 ilustra a obtenção de testemunhos horizontais na região das juntas para permitir o ensaio de resistência à tração da interface.

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral são regidos no Brasil pelo método NBR 7222/94, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Na execução do ensaio é aplicada uma tensão de compressão na geratriz do cilindro, o qual é colocado apoiado em duas taliscas de madeira (contato com os pratos da prensa), conforme apresentado na Figura 3.8.



FIGURA 3.7 Obtenção de Testemunhos Horizontais nas Juntas entre Camadas de Concretagem



(a) Início do Ensaio



(b) Corpo-de-prova Rompido

FIGURA 3.8 Ensaio de Tração por Compressão Diametral Determinando a Resistência à Tração da Junta entre Camadas

A resistência à tração, determinada utilizando resultados conhecidos da teoria da elasticidade para esforço concentrado nas geratrizes superiores e inferiores de um cilindro, pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$f_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (3.3)$$

Onde:

f_t : resistência à tração no do corpo-de-prova no ensaio

P: esforço total aplicado pela prensa

D: diâmetro do corpo-de-prova

L: comprimento do trecho onde o esforço foi aplicado ao longo do corpo-de-prova

3.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA

Ensaio de tração direta causam dúvidas quanto aos efeitos da dificuldade de manutenção da axialidade durante a aplicação da carga e dos dispositivos para fixação dos corpos-de-prova na resistência. Pela simplicidade do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, com um risco relativamente baixo de execução, os ensaios de resistência à tração direta não tiveram um desenvolvimento apreciável no país. No desenvolvimento da técnica executiva do CCR, com as dificuldades de caracterização mecânica do concreto, cresceu a necessidade de verificação das condições do protótipo através de ensaios em testemunhos obtidos através de sondagem rotativa. Esta, em geral, é executada normalmente aos planos de interface entre camadas sucessivas de concretagem. As incertezas quanto aos parâmetros mecânicos para caracterização das juntas trouxeram pesquisas procurando desenvolver o ensaio (RIBEIRO et al., 1998; RIBEIRO, 1998, RIBEIRO et al., 2001, CASTRO, et al. 1998). No Brasil, foram desenvolvidos dois procedimentos de ensaios, que se diferenciam pelos dispositivos para fixação e aplicação do carregamento. O primeiro método utiliza o equipamento Leroy, mostrado na Figura 3.9, e foi desenvolvido no Laboratório de Furnas, em Goiânia (CASTRO et al., 1998). O segundo foi desenvolvido no LAME - Laboratório de Materiais e Estruturas do LACTEC – Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento, onde duas placas de aço com rótulas acopladas são fixadas às

extremidades do corpo-de-prova através do emprego de resina epóxi (RIBEIRO et al., 1998), conforme mostrado na Figura 3.10.



(a) Dispositivo para Fixação



(b) Colocação na Prensa



(c) Ruptura do Corpo-de-prova



(d) Equipamento de Ensaio

FIGURA 3.9 Ensaio à Tração Direta Utilizando o Dispositivo Leroy

O dispositivo Leroy para ensaio de resistência à tração direta é um conjunto de dois elementos que, providos de molas circulares, prendem firmemente o corpo-de-prova, propiciando assim que seja tracionado. Cada elemento é composto basicamente de uma peça cilíndrica, com uma tampa rosqueada, que é acoplada ao sistema de transmissão de carga de tração. A peça cilíndrica tem em seu interior um trecho cônico, onde fica alojada uma mola cilíndrica não contínua, ou seja, que se abre ou se fecha de acordo com o corpo-de-prova. A mola cilíndrica consiste de um anel de aço temperado, de seção transversal triangular, isto é, na parte interna é cilíndrica e na parte externa é cônica. Esta disposição provoca uma pressão de confinamento do corpo-de-prova, tanto maior quanto for a carga de tração.



FIGURA 3.10 Ensaio de Resistência à Tração Direta Desenvolvido no LAME

No equipamento desenvolvido no LAME e no dispositivo Leroy, há dúvidas sobre o efeito de pequenas distorções das placas de apoio com relação à horizontal. Ensaios desenvolvidos por RIBEIRO et al., mostram que a utilização de placa colada apresentam menores dispersões geradas pelo efeito de esforços secundários nas extremidades.

Em Portugal, RIBEIRO em 1998, e outros pesquisadores, em 2001 e 2002 (Figura 3.11), e na Espanha, OLIVARES et al., em 2003 vêm desenvolvendo pesquisa para tornar mais confiáveis os ensaios para a determinação da tração direta, com pesquisas em corpos-de-prova cilíndricos de 15 cm × 30 cm de concreto simulando a junta pelo seu preenchimento em duas etapas, com resultados confiáveis.

Estes esforços europeus procuram seguir os procedimentos propostos nas Recomendações do *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* RILEM CPC7 de 1975, tentando minimizar os problemas usuais deste tipo de ensaio.



FIGURA 3.11 Ensaio para Determinação da Resistência à Tração Direta Executados por RIBEIRO, em 2002

Fonte: Ribeiro et al., 2002

3.7 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Apesar do concreto não apresentar comportamento elástico-linear, a curva tensão-deformação pode, para os concretos convencionais, ser aproximada por um segmento de reta em seu trecho inicial para efeito de avaliação do comportamento mecânico de uma peça qualquer. Em testemunhos de concreto, sempre há um traumatismo inerente ao processo de obtenção que pode causar diferenças em relação aos corpos-de-prova moldados, como pode-se esperar resultados com dispersões consideráveis. Em CCR, com resistências baixas, a natural fragilidade da superfície do testemunho deve ser cuidadosamente considerada quando da análise destes resultados. Os ensaios de módulo de elasticidade são normalizados pelo método NBR 8522/84, cujo procedimento de ensaio está ilustrado na Figura 3.12.



(a) com medidor elétrico (*strain gauge*)



(b) com extensômetro mecânico

FIGURA 3.12 Ensaio para Determinação do Módulo de Elasticidade

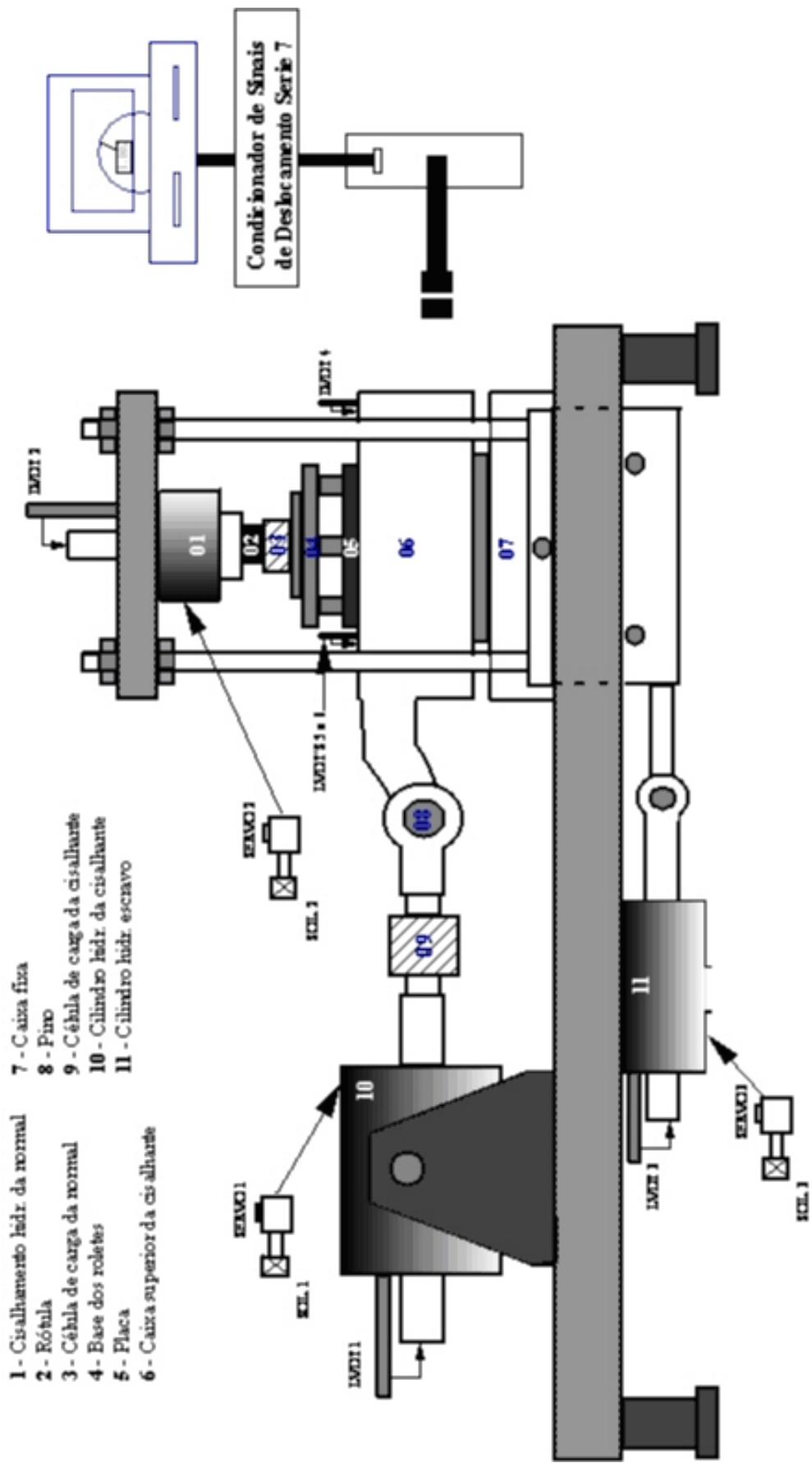


FIGURA 3.14 Desenho Esquemático do Arranjo para Ensaio de Cisalhamento



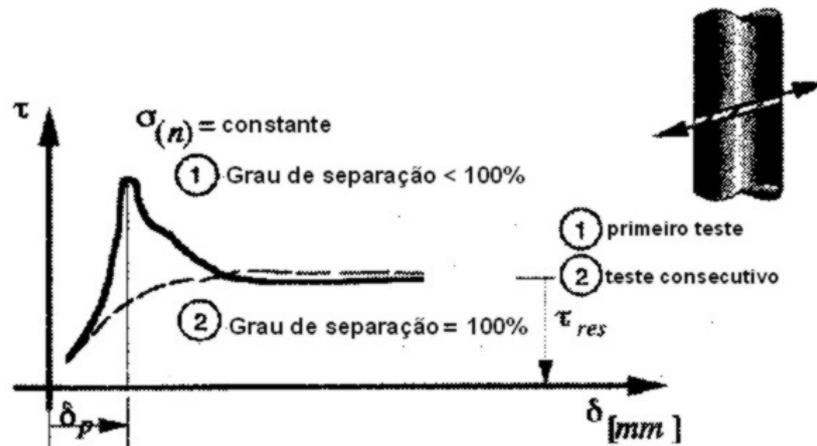
FIGURA 3.15 Equipamento para Ensaio de Cisalhamento Direto



FIGURA 3.16 Corpo-de-prova Confinado na Caixa de Cisalhamento

As curvas tensão de cisalhamento \times deslocamento horizontal, em geral apresentam a forma apresentada na Figura 3.17, onde aparecem um pico para o valor de cisalhamento com um

deslocamento correspondente, e uma tensão de cisalhamento residual que corresponderia a seção totalmente seccionada.



- Legenda:
- $\sigma_{(n)}$: Tensão normal na seção considerada mantida constante
 - τ : Tensão de cisalhamento na seção considerada
 - τ_{res} : Tensão de cisalhamento residual após separação da seção considerada
 - δ : Deslocamento da seção devido à tensão de cisalhamento
 - Grau de Separação: Porcentagem da seção que se apresenta sem continuidade (fraturada)

FIGURA 3.17 Curva Tensão de Cisalhamento × Deslocamento Horizontal Típica

3.9 MOLDAGEM DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DE CCR

Devido a sua consistência e trabalhabilidade, o adensamento de corpos-de-prova cilíndricos de CCR de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura necessita de cuidados para que haja similaridade com o material compactado no campo. As soluções de uso mais freqüente para este propósito, tanto no campo quanto no laboratório, preconizam a compactação com martetele manual tipo Kango como mostrado na Figura 3.18, e corpos-de-prova adensados em mesa vibratória com a aplicação de contrapeso (Figura 3.19). Nestes procedimentos, o aparecimento de argamassa no topo dos corpos-de-prova, correlações de tempo de adensamento e grau de compactação e treinamento da mão-de-obra envolvida são parâmetros a serem considerados.



FIGURA 3.18 Adensamento de Corpo-de-prova com Martetele Tipo Kango
Fonte: RIBEIRO et al., 2002



FIGURA 3.19 Corpos-de-prova Adensados em Mesa Vibratória

3.10 DENSÍMETRO NUCLEAR

A utilização de densímetro nuclear para a determinação da massa específica do CCR recém adensado é um processo simples e rápido para a aplicação no campo e no laboratório. O processo mede a interação dos raios gama provenientes de uma fonte radiativa com os elétrons das órbitas externas dos átomos componentes do concreto, a qual é captada por um detector gama situado a curta distância da fonte emissora. Como o número de elétrons presentes por unidade de volume é proporcional à massa específica, é possível correlacionar o número relativo de raios gamas dispersos com o número de raios gama pela unidade de tempo, que é inversamente proporcional à massa específica úmida do material. A leitura da intensidade de radiação é convertida para a medida da massa específica úmida através de uma curva de calibração apropriada.

A utilização do densímetro pode ser feita através de três processos: retrodispersão, transmissão direta e através de colchão de ar, conforme disposto na Figura 3.20.

A Figura 3.21 mostra a utilização de densímetro nuclear na construção UHE Lajeado, e a Figura 3.22 mostra sua aplicação aos maciços experimentais executados em laboratório.

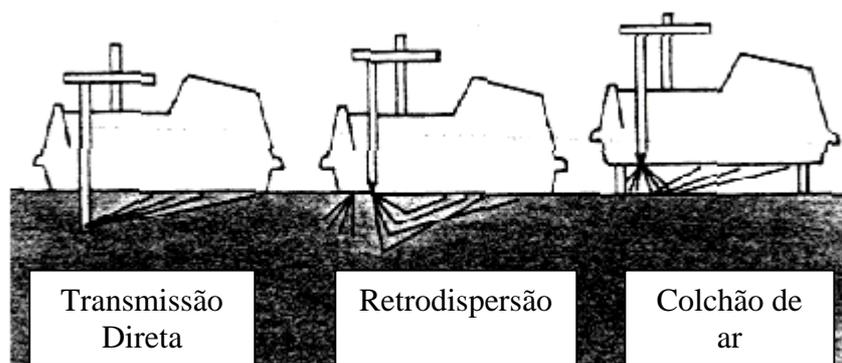


FIGURA 3.20 Representação Esquemática de Utilização do Densímetro Nuclear



FIGURA 3.21 Utilização do Densímetro Nuclear - UHE Lajeado



FIGURA 3.22 Utilização do Densímetro Nuclear durante a Execução de Maciço Experimental em Laboratório

4 DOSAGEM DE CCR COM ALTO TEOR DE FINOS

Os estudos de dosagens em obras hidráulicas têm várias peculiaridades em relação aos processos usualmente utilizados em obras convencionais, sendo em geral mais complexos e revestidos de cuidados especiais, devido aos grandes volumes horários e totais aplicados. Pelas grandes dimensões das peças, e pela grande complexidade de fabricação industrial, os procedimentos de dosagem levam em conta alguns fatos relevantes:

- Elevam-se as preocupações quanto às reações deletérias e cuidados com os efeitos da variação de volume gerada pelas reações de hidratação do cimento. Além dos grandes volumes, existem severas restrições dadas pelas fundações e maciços rochosos que envolvem as estruturas.
- A minimização do consumo de cimento é a preocupação dominante do processo para diminuir os efeitos deletérios e permitir uma economia de escala no processo, para tal o esqueleto de granular deve minimizar os vazios da mistura através da combinação de agregados de tamanhos diferentes, dentro dos limites de manutenção da integridade da massa, capacidade de manuseio e adensamento.
- A utilização de frações de agregados é obtida através do peneiramento após a britagem e facilita o controle de qualidade e a dosagem, que seriam dificultadas com a utilização de bica corrida (ANDRIOLO, 1989).
- Diferentemente das obras convencionais onde há pouca flexibilidade para escolha da granulometria do concreto devido à disponibilidade dos diversos fornecedores, em grandes obras de aproveitamentos hidrelétricos o produtor de agregados é o próprio construtor, que pode planejar as instalações de britagem para otimizar as propriedades dos concretos e minimização seus custos de produção final.
- Os agregados graúdos utilizados correspondem em geral a uma combinação de agregados com dimensões características máximas diferentes, devendo a dosagem estar atenta à administração de estoques gerados nas centrais de britagem.
- Aplicam-se agregados com dimensões características máximas elevadas, podendo chegar em caso de concreto massa a 152 mm.

- No Brasil, devido a escassez de disponibilidade de pozolana atualmente existente, utiliza-se agregado pulverizado para aumentar a coesão e trabalhabilidade do concreto, bem com diminuir a permeabilidade, em quantidades entre 120 e 160 kg/m³ (GRAÇA et al., 2003b). Esta tecnologia é eminentemente brasileira, e estes agregados são obtidos geralmente através de britagem terciária que permita a obtenção de finos (via (BARMAC) ou equipamento similar) (GRAÇA et al., 2003b).

Durante o desenvolvimento da utilização do concreto em estruturas maciças com grandes volumes em relação à área de formas, desenvolvendo os conceitos anteriormente apresentados, surgiu o conceito de concreto massa, usado com grande sucesso no Brasil e no mundo (CBGB et al., 1989; PACELLI DE ANDRADE, 1997). Durante o desenvolvimento do CCR, as várias abordagens sob a ótica da tecnologia de concreto embasaram-se nos conceitos e na aprendizagem obtida das obras de concreto massa, e para estudar o assunto são necessários introduzir vários conceitos e definições, conforme descrito nos próximos subitens.

4.1 GRADUAÇÕES GEOMÉTRICAS

Denomina-se graduação geométrica ou graduação ideal a curva granulométrica contínua, onde as porcentagens retidas em dimensões sucessivas do conjunto normal de peneiras mantêm uma progressão geométrica entre si. Cada graduação geométrica é definida pelo termo de progressão, e para exemplificar, uma graduação de setenta por cento significa que uma peneira qualquer da série normal reterá 70% da massa retida na peneira imediatamente superior.

Chamando de $D_{m\acute{a}x}$ a dimensão máxima característica do agregado, a primeira peneira a considerar como retendo material seria a imediatamente inferior para efeito de cálculo da progressão geométrica (PA) cuja soma é naturalmente 100%. Conhecendo-se a soma da PA e a quantidade de peneiras que restam na série normal, pode-se facilmente determinar a porcentagem retida na primeira peneira como mostrado na equação 4.1.

$$\beta = \frac{(1 - \alpha)100}{1 - \alpha^n} \quad (4.1)$$

Onde:

α : é a razão da graduação geométrica

β : é a porcentagem retida na primeira peneira (material que passa na peneira correspondente a $D_{m\acute{a}x}$ e retida na imediatamente inferior)

n : é o numero de peneiras da série normal a partir da que define $D_{m\acute{a}x}$

Com os valores anteriormente definidos, pode-se determinar o Módulo de Finura, a partir de agora denominado M.F., da graduação geométrica, conforme indicado na Equação 4.2, onde as variáveis têm o significado anteriormente definido.

$$M.F = \frac{\beta}{1-\alpha} \left[n + \frac{\alpha^n - 1}{1-\alpha} \right] \quad (4.2)$$

4.2 CURVAS DE REFERÊNCIA DE TALBOT-RICHARD

As curvas de Talbot-Richard fornecem curvas granulométricas que procuram a obtenção do índice de vazios mínimo de um pacote de agregados. A equação (4.3) apresenta a porcentagem acumulada passante em cada peneira gerando a curva de Talbot-Richard para agregados graúdos, com dimensões em polegadas.

$$p = \frac{d^x - 0,1875^x}{D_{m\acute{a}x}^x - 0,1875^x} \quad (4.3)$$

Onde:

- p: porcentagem acumulada que passa na peneira de malha d
- d: abertura da malha da peneira considerada em polegadas
- x: é o expoente que indica se o agregado é natural ou artificial, assumindo o valor 0,5 para agregado britado e 0,8 para agregado natural
- $D_{m\acute{a}x}$: Dimensão Máxima Característica do Agregado

Quando o agregado miúdo é considerado juntamente com o agregado graúdo a equação (4.3) passa a assumir a forma contida na equação (4.4).

$$p = \frac{d^x - 0,00293^x}{D_{m\acute{a}x}^x - 0,00293^x} \quad (4.4)$$

4.3 CURVAS DE REFERÊNCIA DO ACI COMMITTEE 207

O ACI fornece curvas de referência para a granulometria dos agregados visando minimizar os vazios, conforme equação (4.5).

$$p = \left(\frac{d}{D_{m\acute{a}x}} \right)^x \times 100 \quad (4.5)$$

Onde:

- p: porcentagem acumulada que passa na peneira de malha d
- d: abertura da malha da peneira considerada em polegadas
- $D_{m\acute{a}x}$: Dimensão Máxima Característica do Agregado
- x: é o expoente que indica se o agregado é natural ou artificial, assumindo o valor 0,4 para agregado britado e 0,5 para agregado natural

4.4 CURVAS GRANULOMÉTRICAS CÚBICAS

Os trabalhos pioneiros de Fuller e Bolomey para a determinação de curvas granulométricas ideais, procurando a maior massa unitária compactada dos agregados, levaram a curvas granulométricas exponenciais, que quando calibradas forneceram subsídios para vários processos de dosagem. A curva granulométrica cúbica que deriva destes estudos está apresentada na Equação (4.6), e é a proposta de curva mais utilizada como guia para a dosagem de CCR (GENTILE, 1964; FORBES, 1988; ANDRIOLO, 1989; e PACELLI DE ANDRADE et al., 1997).

$$p = 1 - \left(\frac{d}{D_{máx}} \right)^3 \quad (4.6)$$

Onde:

p: porcentagem acumulada que passa na peneira de malha d

d: abertura da malha da peneira considerada em mm

$D_{máx}$: Dimensão Máxima Característica do Agregado

4.5 LEI DE SLATER LYSE

Independentemente de diferentes porcentagens individuais para cada peneira diferentes, concretos com o mesmo módulo de Finura da combinação de agregados, apresentam consistência e, por conseguinte trabalhabilidade substancialmente semelhantes.

4.6 PROCEDIMENTO DE DOSAGEM DE CCR COM ALTO TEOR DE FINOS

Como no estudo de qualquer concreto, a dosagem de CCR se baseia no respeito às especificações de projeto, na obtenção do material mais econômico possível dentro daquelas

limitações, mantendo a homogeneidade em todas as etapas da fabricação. Das várias técnicas de dosagem de concreto massa, e de vários resultados de concretos executados pode-se depreender:

- Quanto maior a dimensão máxima característica dos agregados graúdos utilizados, menor será o consumo de areia para manter a trabalhabilidade e resistência especificada e, como conseqüência, serão menores os consumos de água e de cimento (ANDRIOLO, 1998; ACI COMMITTEE 211, ACI COMMITTEE 207 e PACELLI DE ANDRADE et al., 1997).
- Tendo em vista que com o aumento da dimensão máxima característica do agregado graúdo, diminui o consumo de cimento dos concretos massa, diminuindo como conseqüência o consumo de água e o teor de areia utilizado, PACELLI DE ANDRADE et al., em 1997, mostram um resumo gráfico dos consumos dos diversos materiais obtidos no programa de dosagens da Usina Hidrelétrica Itumbiara, variando a Dimensão Característica Máxima dos agregados graúdos para resistências médias a compressão de 13 MPa e 25 MPa. A Figura 4.1 mostra os resultados obtidos, onde foi utilizado para o agregado miúdo 80% de areia natural e 20% de areia artificial.

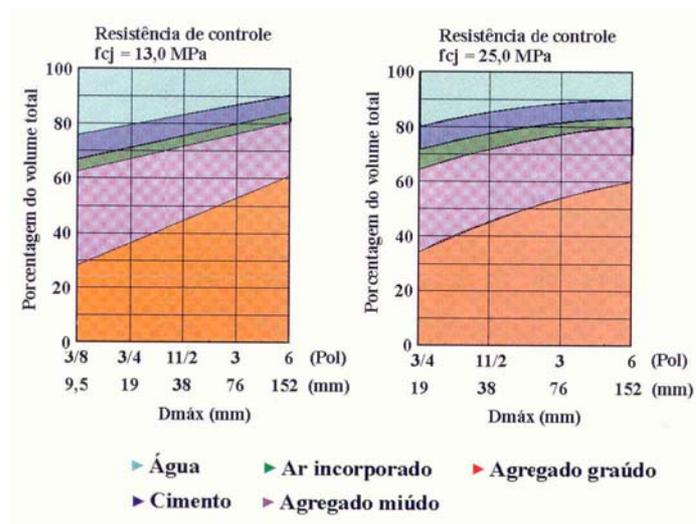


FIGURA 4.1 Volumes Absolutos dos Componentes dos Concretos Utilizados na barragem de Itumbiara

Fonte: Concretos - Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo - Ensaios e Propriedades – 1997

- Os parâmetros do concreto sofrem obviamente muita influência do teor de areia. Para um determinado consumo de cimento, teores mais altos que o ideal acarretam um consumo maior de água e portanto uma diminuição da resistência; enquanto, teores baixos levam a existência de vazios após o adensamento e portanto também diminuem a resistência (BASÍLIO, 1984; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997).
- Apesar dos estudos de Feret indicarem que o índice de vazios mínimo se obtém com granulometria descontínua (BASÍLIO, 1984; HELENE e TERZIAN, 1993), para a manutenção da integridade da massa, curvas contínuas são mais adequadas, minimizando o consumo de cimento para uma mesma consistência e mesma relação água/cimento. A utilização de graduações geométricas e suas assemelhadas permite a continuidade de grãos, e são usualmente utilizadas nas dosagens de concreto massa, evitando o excesso de algum tamanho de agregado minimizando a segregação.
- Concretos com granulometrias descontínua apresentam, em geral, menor trabalhabilidade, necessitando maior energia para obtenção de adensamento adequado (BASÍLIO, 1984).
- Como apresentado, o aumento da dimensão máxima característica do agregado graúdo permite uma diminuição dos custos do concreto massa, porém para valores maiores que 38 mm aumenta muito a tendência de segregação do concreto durante o lançamento (ANDRIOLO 1989), devendo ser analisados os custos de equipamentos e mão-de-obra necessários para contornar o fenômeno.
- Apesar da água de molhagem, e, por conseguinte, o consumo de água, aumentarem com o aumento da superfície específica dos agregados, agregados com Dimensões Máximas Características inferiores a 0,15 mm atuam como agente lubrificante reduzindo o atrito dos grãos maiores, podendo até reduzir aquele consumo (RODRIGUES, 1984; BASÍLIO, 1984; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997; e NEVILLE, 1982).
- Em concretos com consumos de água muito pequenos, pela dificuldade de se atingir adensamentos adequados, a partir de certo limite a correlação de aumento de resistência com a diminuição da relação água/aglomerante passa não existir mais (ANDRIOLO, 1998). Procedimentos para a avaliação da consistência baseados no

preenchimento dos vazios, como o Vebe modificado e o *Cannon Time*, podem servir de guia para o acerto do consumo de água.

- Aliada a necessidade de consumos muito pequenos de água, existe a necessidade de envolvimento de todos os grãos do concreto e o preenchimento dos após o processo de compactação. A utilização de partículas finas no concreto influi na trabalhabilidade do concreto, aumentando sua coesão e como benefício adicional aumenta a massa específica e diminui a permeabilidade pela diminuição dos vazios da massa. (ANDRIOLO, 1989; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997 e HANSEN e REINHARDT, 1991).
- Prevendo-se a utilização dos finos obtidos pela pulverização dos agregados, junto com a britagem do agregado miúdo, deve ser levado em conta, durante os procedimentos de dosagem, consumo de agregado miúdo que os garantam (PACELLI DE ANDRADE et al., 1997).
- O CCR possui um consumo de água baixo e para fechamento dos vazios utiliza uma quantidade de finos maiores comparativamente com àqueles usados no concreto convencional, sendo, portanto, muito sensível a perda de água durante a execução. A utilização de aditivos plastificantes e retardadores de pega passa a ter importância, sendo seu emprego tornado comum nos últimos anos (GRAÇA et al., 2003), sendo especialmente úteis em regiões com grandes variações sazonais de clima como as regiões Sul e Sudeste do Brasil.

Os processos de dosagem do CCR com alto teor de finos (ATF) são semelhantes e em geral seguem a seqüência a seguir especificada (ANDRIOLO, 1998; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997 e HANSEN e REINHARDT, 1991).

4.6.1 Escolha e caracterização dos materiais

A escolha do tipo de cimento para obras de grande porte será determinada, obviamente, pela disponibilidade cotejada contra os custos de transporte, pois este tipo de empreendimento geralmente está localizado em regiões afastadas dos grandes centros urbanos. Hoje no Brasil, a grande maioria dos cimentos tem algum tipo de adição, e no caso de grandes volumes de concreto, cimentos com adição de materiais pozolânicos, através de misturas na fábrica e/ou na obra, passam a oferecer vantagens sob o aspecto de prevenção contra reações deletérias

expansivas, aumento da integridade da massa, diminuição dos efeitos das reações termogênicas da hidratação do cimento e preenchimento de vazios via efeito filer.

Pela característica de produção no local da obra dos agregados necessários à execução do concreto, devem ser realizados intensos prospecções prévias a procura de materiais granulares naturais na região com suas respectivas distâncias de transporte e avaliação geológica de rochas para obtenção de agregados britados. A necessidade e conveniência de utilização dos finos levam à utilização do filer resultante da pulverização da rocha quando da obtenção de agregados por britagem, podendo-se, conforme a conveniência, serem utilizados materiais siltsos locais.

A utilização de agregados pulverizados têm-se sido comum no país e seus resultados têm sido satisfatórios (ANDRIOLO, 1998; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997; e GRAÇA et al., 2003). Alguns destes materiais podem apresentar algum grau de atividade pozolânica dependendo da petrografia da rocha utilizada para sua obtenção. Mesmo sendo esta atividade incipiente, seus efeitos positivos na trabalhabilidade como complemento da pasta e seu efeito filer no preenchimento de vazios é muito importante, levando à obtenção de concretos com menores permeabilidades e maiores massas específicas (ANDRIOLO, 1998; e PACELLI DE ANDRADE et al., 1997).

Os materiais siltsos devem ter seus torrões facilmente desagregáveis pelas mãos quando secos ao ar, e mais que 35% de seus grãos passantes pela peneira n° 200 (PACELLI DE ANDRADE et al., 1997}.

Para evitar aglomerações indesejáveis nos processos de mistura e dificuldades de manuseio por coesão excessiva, deve ser levada em conta a plasticidade dos finos (ANDRIOLO, 1989; CARMO, 1995; e PACELLI DE ANDRADE et al., 1997).

A utilização de plastificantes dependerá das necessidades da obra e da avaliação de seu impacto nos custos finais do CCR. Em regiões com variações sensíveis de clima entre as condições de concretagem durante o dia e durante o ano, sua utilização passa a ser importante para minimizar as variabilidades do processo.

4.6.2 Combinação do material cimentício

A combinação do cimento com outros materiais cimentícios depende fundamentalmente de sua disponibilidade e dos custos envolvidos. A priori podem ser efetuadas combinações diversas de materiais, levando em conta que presença de material pozolânico deverá garantir a

inibição de reações deletérias e deverão ser atingidas as propriedades especificadas com custo módico. Em geral os consumos de materiais cimentícios estão compreendidos entre 50 kg/m^3 e 200 kg/m^3 , e dependendo da qualidade dos materiais pozolânicos e agregado pulverizado seu percentual total com relação ao material cimentício deve se situar entre 20% e 70%. (PACELLI DE ANDRADE et al., 1997)

4.6.3 Combinação de agregados e ajuste à granulometria de referência

Para a curva granulométrica, a utilização de curva cúbica, incluindo as peneiras referentes aos finos, garante a presença da quantidade de finos necessários ao preenchimento dos vazios e à trabalhabilidade, através do aumento da coesão e da integridade da massa nas diversas etapas da execução. Em geral se utiliza a curva cúbica de Bolomey/Fuller, considerando uma faixa de tolerância de $\pm 5\%$, conforme mostrado na Figura 4.2. Este tipo de curva reduz a fração de agregado graúdo da mistura, tendo uma quantidade alta de finos, possibilitando uma baixa relação agregado graúdo/agregado miúdo. (GENTILE, 1964; FORBES, 1988; ANDRIOLO, 1989; e PACELLI DE ANDRADE et al., 1997)

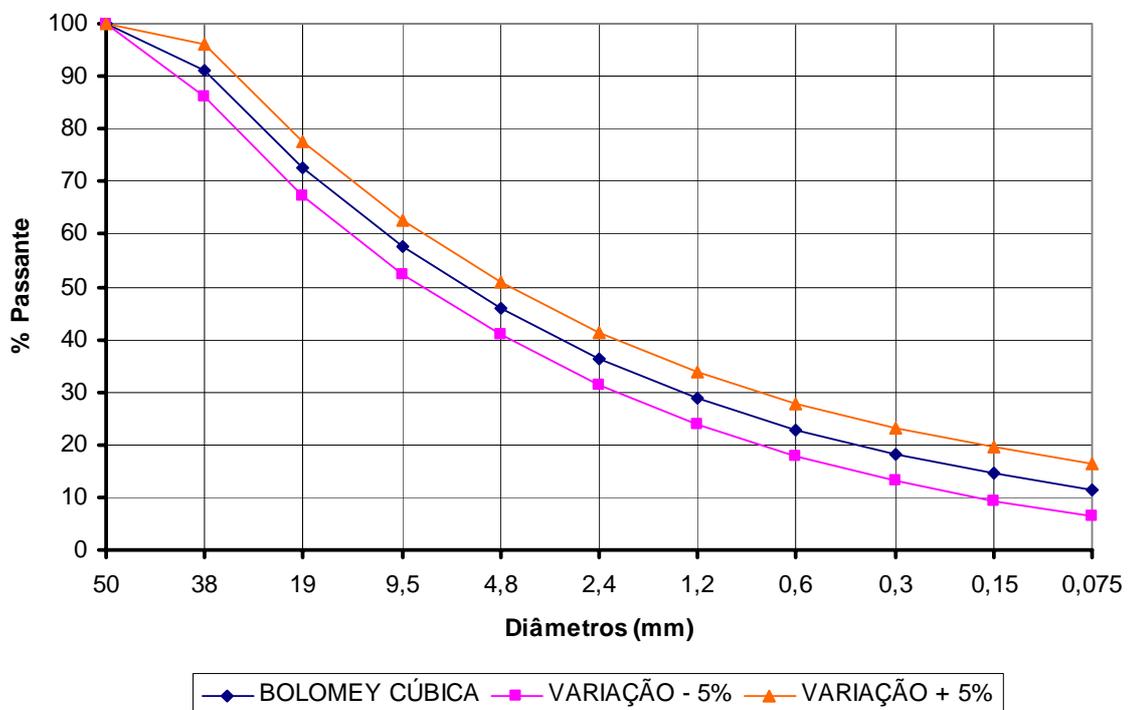


FIGURA 4.2 Faixa Granulométrica de Referência baseada na curva cúbica

Comparando a curva de cúbica com graduações geométricas de 58%, 80% e 85% e com as curvas granulométricas do ACI e Talbot-Richard, verifica-se, conforme mostrado na Figura 4.3, que sua fração de finos é muito maior que as preconizadas nas graduações geométricas, e superior a curva de referência do ACI Committee 207. Para efeito ilustrativo e comparação com as granulometrias usualmente utilizadas em concretos convencionais, a curva de Talbot-Richard se aproxima da graduação geométrica 70%, e fornece concretos com maiores frações dos agregados graúdos que a curva cúbica. A graduação geométrica 85% se assemelha a curva de Bolomey/Fuller nos agregados de maior diâmetro, porém forneceria uma curva muito pobre na porção mais fina dos agregados. Em contrapartida, a curva de referência do ACI, fornece uma granulometria mais contínua que a preconizada por Talbot-Richard, com uma previsão de agregados no espectro mais fino, porém significativamente menor que o da curva cúbica.

Pelas observações previamente apresentadas, verifica-se que a curva cúbica de Bolomey/Fuller indica uma continuidade suave de variação de material retido entre os diversos diâmetros consecutivos, e fornece uma quantidade expressiva de material fino, com 12,5% do material passando pela peneira n° 100 e 10% pela de n° 200.

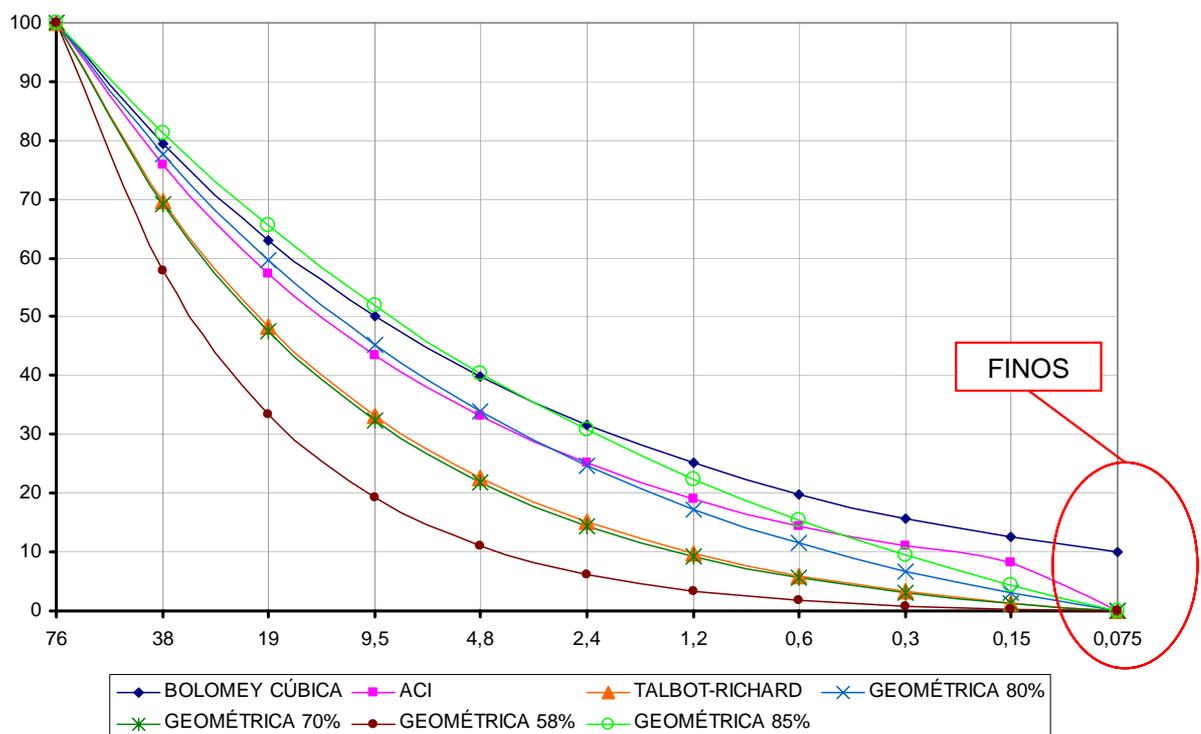


FIGURA 4.3 Comparação de curvas Granulométricas

As curvas de referência representam um guia inicial para o projeto da dosagem, a granulometria final deverá ser resultado de um organizado programa de ensaios, onde será comprovado o atendimento aos requisitos de projeto e necessidade da obra.

A determinação final das porcentagens de cada fração granulométrica é determinada em função dos resultados em termos de trabalhabilidade, capacidade de compactação e satisfação das necessidades de projeto com o menor consumo possível de aglomerante. A relação pasta/argamassa deve ser otimizada considerando o índice de vazios do agregado miúdo para que se obtenha trabalhabilidade que garanta uma compactação adequada. A relação ideal garante o preenchimento dos vazios dos agregados da pasta, considerando a composição do gráudo e do miúdo. Para o controle da eficiência do processo é importante a execução de ensaios que determinem os índices de vazios do agregado miúdo e do agregado gráudo separadamente para avaliar a sua combinação (PACELLI DE ANDRADE et al., 1997).

A composição final sofre grande influência da forma e textura do agregado miúdo, devendo a central de britagem prever a obtenção de areia artificial com a forma mais cúbica possível (BASÍLIO, 1984; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997; e ANDRIOLO, 1998). Estudando várias dosagens, PACELLI DE ANDRADE et al., em 1997, concluíram que a forma ideal das partículas deve ser tal que a porcentagem de vazios do agregado miúdo seja de $38\% \pm 1\%$. Valores superiores afetam o teor de materiais cimentícios, e valores inferiores interferem na trabalhabilidade. Obviamente, a determinação do teor de areia será decorrente do processo de dosagem, dependendo dos materiais disponíveis.

A mistura de agregados gráudos pode ser determinada através da composição das frações escolhidas tendo como parâmetro sua massa unitária, ou através de composição com os agregados miúdos no processo de determinação do traço do concreto.

4.6.4 Definição das Misturas Experimentais

A definição das várias misturas experimentais para a determinação do traço procurado começa pela avaliação do teor necessário de areia da mistura. O proporcionamento das frações de gráudo pode ser feita em ensaios prévios de determinação da maior massa unitária compactada, ou determinada ou ajustada pela variação das porcentagens dos agregados gráudos e do teor de areia. Este procedimento pode ser executado facilmente fixando-se valores para o

consumo de material cimentício, e para cada valor executar traços para combinações de agregados graúdos, variando para cada uma os teores de areia.

O consumo de aglomerante, nas barragens brasileiras, geralmente varia entre 60 kg/m^3 e 120 kg/m^3 considerando no total a soma de cimento Portland e materiais pozolânicos, e a sua definição será baseada nos resultados dos ensaios que definam os parâmetros de controle aliadas a uma trabalhabilidade adequada.

Para avaliara a utilização de aditivos, misturas contendo uma variação no seu teor devem ser previstas e comparadas com aquelas que não os prevêm.

4.6.5 Verificação da trabalhabilidade e capacidade de compactação

No Brasil, os ensaios para verificação da trabalhabilidade mais utilizados se baseiam no ensaio de Vebe modificado em mesa vibratória. Nestes ensaios procura-se verificar o preenchimento dos vazios do concreto quando da aplicação de energia de vibração. A Figura 4.4 mostra o ensaio para determinação do *Cannon Time* três fases do processo: o enchimento do cilindro imediatamente antes do início da vibração, uma fase intermediária onde o material já iniciou seu adensamento e o final do ensaio onde a argamassa preencheu os vazios do CCR.

As dificuldades inerentes ao processo de simulação de CCR em laboratório exigem a verificação prévia da sua adequação através de observações visuais na betoneira, verificando a homogeneidade, a textura e tendência à segregação no processo de mistura e quando da remoção da massa da betoneira. Os ensaios de trabalhabilidade, devido a sua característica de permitir visualizar o fechamento dos vazios do esqueleto granular, permitem uma avaliação da capacidade de obtenção de adensamento adequado no campo. As comparações da massa específica do CCR e de seu grau de compactação com a máxima massa unitária teórica, permitem a verificação do ajuste da mistura para efeitos de compactação. Estes ensaios podem ser visualizados na Figura 4.4. A escolha do *Cannon Time* ideal para compactação foi um desafio desde o início do desenvolvimento do CCR, com preocupações com relação a interferência com capacidade de trabalho do rolo de compactação, temendo-se a possível aderência da pasta no equipamento. As primeiras especificações determinaram, em sua grande maioria, concretos mais secos, com *Cannon Time* variando de 50s a 30s. Com o desenvolvimento da técnica observa-se tendência de utilização de valores entre 12s e 20s, aliados a dosagens cuidadosas quanto a granulometria especialmente no teor de finos. Como o concreto perde umidade durante o

processo de transporte e lançamento, haverá uma inevitável perda de trabalhabilidade no processo e a dosagem deverá levar em conta as necessidades na praça de trabalho.

A medida da massa específica compactada pode ser facilmente realizada a partir do ensaio para determinação do *Cannon Time*, como já descrito. Através da comparação do valor determinado com a massa específica teórica, determina-se o grau de compactação da mistura, que permite avaliar a eficiência do adensamento na mesa vibratória, fornecendo parâmetros para análise, escolha e correção da mistura.



(a) Fase Inicial com Molde Preenchido



(b) Fase Intermediária com CCR Adensando



(c) Final do Ensaio

FIGURA 4.4 Determinação do *Cannon Time* em Fase Inicial, Intermediária e no Final do Processo

4.6.6 Ensaios com o concreto fresco e preparação de corpos-de-prova para ensaios de concreto endurecido

Já foram descritos nos itens anteriores os ensaios para a determinação da consistência do CCR, através da determinação do *Cannon Time*, ou utilizando ensaios alternativos como Vebe modificado, e ensaios para determinação da massa específica compactada. Outros ensaios a serem executados são:

- Temperatura do concreto fresco;
- Teor de umidade do concreto integral e/ou da fração passante na peneira n° 4;
- Permeabilidade do concreto fresco, que permite avaliar o fechamento da mistura; e
- Preparação de corpo-de-prova para os ensaios com o concreto endurecido.

4.6.7 Gráficos de Dosagem

Para a escolha das dosagens a serem empregadas durante a construção, é necessária uma análise criteriosa dos dados obtidos com a bateria de ensaio visando a satisfação dos critérios de projeto, o atendimento às necessidades construtivas, e a minimização dos custos. Trabalhando com consistências fixadas, podem ser traçados, como ferramentas auxiliares da decisão, os seguintes gráficos:

- Resistência à compressão nas diversas idades

Estes gráficos permitem a visualização do comportamento do ganho de resistência com o tempo, podendo ser traçado para cada mistura proposta e ainda segregando valores para o processo de escolha. Neste caso, podem ser utilizadas curvas considerando o mesmo consumo de cimento e variando a quantidade de material pozolânico; e para a variação da resistência para consumos equivalentes de material cimentício.

- Resistência à compressão em função da relação água/materiais cimentícios

Neste caso podem ser segregados os valores com utilização ou não de aditivos.

- Resistência à compressão em relação ao consumo total de água

Da mesma forma, os valores devem levar em conta a presença de aditivos.

- Rendimento dos materiais cimentícios no tempo

Este gráfico permite a avaliação do ganho de resistência por consumo de materiais cimentícios para a trabalhabilidade requerida. Complementada por gráficos que mostrem a correlação entre a relação pasta/argamassa em relação à porcentagem de argamassa e em função da porcentagem de agregado miúdo, esta curva permite avaliar a eficiência das diversas misturas.

- Resistência à compressão em função da relação pasta/argamassa

4.6.8 Escolha dos traços adequados

As dosagens escolhidas para emprego da obra serão aquelas que apresentarem adequação ao processo construtivo, minimizando a segregação do manuseio e permitindo o adensamento adequado, e que satisfaçam aos requisitos de projeto, com o menor custo possível. Como já mencionado, quando da previsão da consideração na mistura dos finos gerados pela pulverização dos agregados, o consumo de areia deverá garantir sua presença.

Quando da utilização no campo, deverá ser observado o comportamento da mistura nas diversas fases da concretagem, face às sazonalidades climáticas e alterações inerentes ao processo de britagem, para ajustar continuamente os traços definidos em laboratório, seguindo para esta correção as mesmas diretrizes já utilizadas nas dosagens prévias.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Pode ser observado que, durante o desenvolvimento da aplicação do CCR em empreendimentos hidráulicos e até a presente data, várias dúvidas e incertezas cercam seu projeto, execução e as expectativas de comportamento durante a operação. Durante a execução do presente documento, procurou-se criar um arcabouço lógico onde foram discutidas as várias interferências no processo. Chega-se a conclusão que o mesmo deve ser tratado holisticamente, estudando-se todas as fases e necessidades da obra.

A previsão de valores dos parâmetros a controlar e a verificação da satisfação das propriedades especificadas no campo fazem parte dos processos construtivos envolvendo o concreto. Pela grande responsabilidade das barragens de concreto, as análises de segurança devem ser precisas, baseadas em dados confiáveis; e, a garantia da qualidade do processo é fundamental. A utilização de novas técnicas sempre requer a pesquisa das correlações entre os modelos desenvolvidos no laboratório e os valores realmente obtidos no protótipo, além de serem necessárias calibrações envolvendo os métodos e ensaios para o controle da qualidade.

Como já observado, os ensaios comumente utilizados em barragens de concreto convencional têm restrições importantes quando aplicados sem nenhum tratamento em obras equivalentes de CCR, devendo ser calibrados para poderem varrer toda a gama de fatores que influenciam no processo. Estas restrições, aliadas a grande quantidade de juntas subhorizontais, geraram uma série de dúvidas que serviram de barreira para a utilização da solução nos primeiros anos de seu desenvolvimento.

A grande variabilidade de materiais componentes e a influência dos processos construtivos e das condições climáticas locais fazem com que seja prudente uma bateria de exaustivos ensaios iniciais e o treinamento das equipes de trabalho. O objetivo de qualquer grupo de ensaios é modelar o comportamento do protótipo, fornecendo dados para que se garanta a qualidade final conforme especificada pelo projeto, tanto sob o ponto de vista de resistência aos esforços mecânicos quanto o de durabilidade.

Após a definição da necessidade de um empreendimento hidráulico e a verificação da sua atratividade como negócio, as análises de viabilidade técnica e obtenção da melhor solução passam necessariamente pela escolha dos materiais componentes e dos métodos executivos. A eleição de barragem em CCR passa inicialmente pela verificação da disponibilidade de rocha adequada à produção de agregados, verificando potenciais reações deletérias, da capacidade de

fornecimento dos demais materiais necessários à confecção de concreto e da logística necessária ao seu transporte e armazenamento. Estes estudos devem estar conectados a análises geológico-geotécnicas para verificação da competência da fundação para suporte do tipo de estrutura escolhido, além de análises de agressividade da água e climatológicas.

O desenvolvimento das tarefas necessárias a execução com sucesso de CCR aplicado às barragens segue os mesmos ensaios iniciais executados durante o desenvolvimento de obras similares, executadas com concreto convencional. Como discutido nos Capítulos 2 e 4, alguns ensaios utilizados usualmente em obras de CCR necessitam de adaptação e de calibração para interpretação de seus resultados. Os resultados da caracterização de parâmetros devem estar correlacionados com controle de qualidade no campo, que utiliza parâmetros como o grau de compactação, a massa específica do concreto fresco, o consumo de água de amassamento para avaliação do processo de adensamento; e, para a verificação dos parâmetros controlados do concreto endurecido, são analisados os resultados de ensaios em corpos-de-prova moldados. As dificuldades de correlação de parâmetros de corpos-de-prova moldados com o material compactado no campo são resolvidas em parte por um programa de execução de maciços experimentais na obra, aliados à programa de ensaios de testemunhos, ou a extração de testemunhos nos primeiros estágios de concretagem. Em geral, este tipo de abordagem induz à utilização de misturas mais ricas no início da obra, e adiciona incertezas no processo de desenvolvimento do empreendimento. Particularmente no caso de caracterização mecânica da interface entre juntas sucessivas de concretagem, o controle da qualidade é muito mais complexo, apesar de ser a caracterização dos parâmetros de resistência fundamental aos processos de análise de segurança. Os ensaios são de difícil execução e interpretação, sendo executados basicamente em testemunhos para aumentar a confiabilidade.

A execução de maciços experimentais em laboratório abre caminho para a otimização prévia das misturas a serem utilizadas já nas primeiras fases da construção, e pela facilidade de manuseio permitem a realização de vários ensaios cuja execução na obra seria muito complexa. A parametrização prévia das diversas grandezas necessárias ao projeto em laboratório permitiria análises de segurança e dimensionamento mais apurados, diminuindo incertezas; permitindo a sua validação pelos processos usuais do controle de qualidade e um dimensionamento mais adequado das facilidades industriais do canteiro de obras. Apesar das vantagens mencionadas, geradas pela facilidade de manuseio e pela possibilidade de obtenção de dados previamente ao início das tarefas no campo, a utilização segura do maciço experimental necessita de validação com resultados obtidos em protótipos.

Reconhecendo os benefícios teóricos da execução de maciços experimentais em laboratório, propõe-se um ciclo de pesquisa envolvendo laboratório e campo para calibrar os diversos modelos físicos utilizados para previsão e verificação de parâmetros das propriedades físicas de interesse em barragens de CCR. Os estudos consideram a execução de programa de ensaios em maciços experimentais em laboratório utilizando os mesmos materiais e dosagens utilizados na construção da barragem da UHE Dona Francisca. Este programa permite a comparação dos resultados obtidos com os dados do controle de qualidade da obra, criando condições para a avaliação do grau de semelhança entre os procedimentos da obra e do laboratório. O programa procurará, também caracterizar os parâmetros mecânicos das interfaces entre juntas consecutivas de concretagem, variando alguns fatores considerados importantes no processo, como presença de argamassa de ligação, intervalos de lançamento, preparo da camada para receber a concretagem e algumas variações das condições de exposições das camadas.

O trabalho proposto utiliza os dados de campo e os materiais da Usina Hidrelétrica Dona Francisca, pertencente a DFESA, construída no Rio Grande do Sul. Todos os ensaios relativos às pistas experimentais em laboratório foram realizados no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A., localizados em Goiânia. Os ensaios de campo foram executados sob a orientação e responsabilidade do LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas, convênio da Universidade Federal do Paraná - UFPR, Companhia Paranaense de Energia – COPEL e Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento – LACTEC, que foi contratado para executar os trabalhos de Controle e Garantia da Qualidade para o consórcio construtor, formado pelas empresas Ivaí Construtora de Obras Ltda. e Torno, da Itália. Os dois laboratórios citados são credenciados pelo INMETRO e possuem certificação ISO 9002, que fornece confiabilidade aos ensaios desenvolvidos na pesquisa.

Nesta pesquisa, obtendo-se resultados dos maciços experimentais de laboratório semelhantes estatisticamente aos comportamentos dos protótipos e dos sistemas utilizando corpos-de-prova moldados, cria-se uma ferramenta que auxiliará a tomada de decisão em obras de CCR, tornando o processo mais confiável. Também é aberto um caminho expressivo para a pesquisa, criando condições de simulação de várias condições de projeto e execução, que seriam impossíveis durante a execução normal de uma obra.

5.1 EQUIPAMENTO PARA COMPACTAÇÃO DE CCR EM LABORATÓRIO

O equipamento para compactação de CCR em Laboratório, mostrado nas Figuras 2.40 e 2.41, faz parte de um complexo com serviços auxiliares que permitem a execução dos maciços experimentais, também denominados no meio técnico nacional como pistas experimentais. Pelo grande volume de concreto necessário aos ensaios, e pela necessidade de execução de estudos anteriores à construção das facilidades industriais no campo, o laboratório tem a sua disposição uma pequena central de britagem, um betoneira com capacidade de mistura igual a 1,5 m³ de concreto, uma ponte rolante para transporte dos maciços e uma câmara úmida com abertura no teto para acesso aos corpos-de-prova. Para a execução de ensaios em corpos-de-prova, ou maciços experimentais, são ainda importantes os pátios para armazenamento de materiais, serra de fio diamantado e equipamento de extração de testemunhos.

O equipamento para compactação em laboratório é composto de um sistema de trilhos sobre o qual se movimenta a estrutura do pórtico de sustentação do rolo compactador. A compactação é executada em molde metálico situado em um poço construído abaixo do piso na área central aos trilhos. Os moldes devem ter largura de 900 mm, com comprimento máximo de 3.000 mm. Pelas limitações geométricas naturais dadas pela forma, a compactação não é efetiva em todo o maciço experimental, como pode ser observado nas Figura 5.1 e 5.2. Como o rolo compactador tem 650 mm de largura, os 250 mm restantes, igualmente divididos nas laterais, devem ser adensados através de compactador manual, conforme ilustrado na Figura 5.3. Da mesma forma, longitudinalmente, o limite da capacidade de compactação se restringe ao centro do corpo-de-prova no trecho limitado a 450 mm medidos a partir de cada borda. Estas últimas extremidades podem ser utilizadas para simulação dos processos de execução das faces de montante e/ou jusante da barragem ou das laterais de galerias. As irregularidades apresentadas são acertadas com a aplicação de vibro-acabadora de placa manual conforme mostrado na Figura 5.4.

O aparato é único no Brasil, sendo seu projeto e construção totalmente nacionais, e, até a presente data, não foi encontrado registro de nenhum similar em funcionamento no mundo, estando desativado o similar do Central Research Institute of Electric Power Industry – CRIEPI, no Japão. Seu controle é totalmente digital e integrado em uma única CPU PC compatível, com o sistema tendo uma taxa de atualização de 2000 vezes por segundo. O sistema digital pode receber programações separadas de posicionamento e aplicação de carregamento. No controle por carga, o sistema impõe uma condição de força estática e dinâmica pré-definida, ficando a cargo do

sistema as correções necessárias para a manutenção dessas condições, ou seja, variação da posição e amplitude de curso do atuador em função da maior ou menor rigidez da região que está sendo trabalhada e das irregularidades da superfície.

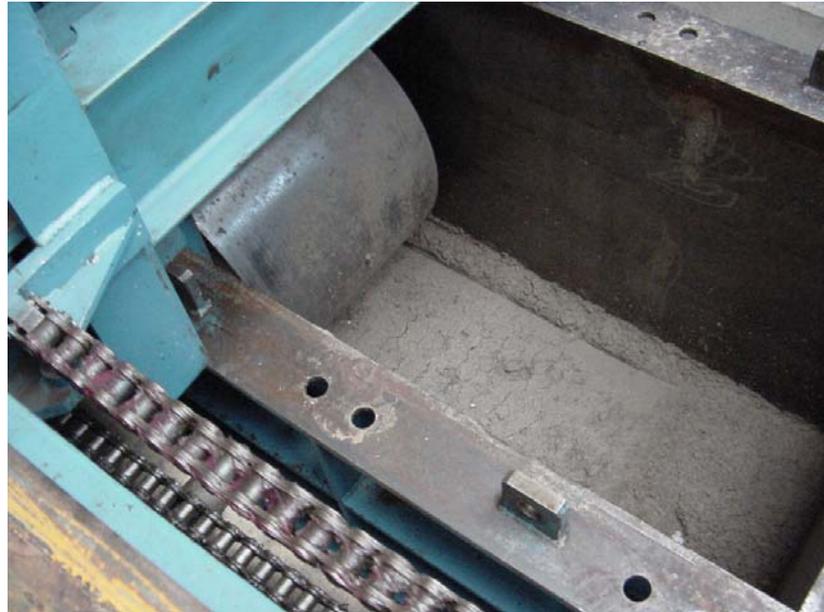


FIGURA 5.1 Detalhe da Lateral do Maciço Experimental durante a Compactação



FIGURA 5.2 Topo de Camada recém Compactada em Maciço Experimental no Laboratório



FIGURA 5.3 Compactação Manual da Lateral de Camada do Maciço Experimental em Laboratório



FIGURA 5.4 Regularização do Topo da Camada com Vibro-acabadora Manual

O equipamento de compactação é composto basicamente por três sistemas, um de movimentação horizontal, um de movimentação vertical e um de aplicação de carga. A movimentação horizontal do rolo é efetuada através de um sistema de correntes e rodas dentadas, acionadas por um servomotor elétrico acoplado a um redutor, com a característica de que o rolo gire de forma sincronizada com o movimento de translação ao longo do maciço experimental, evitando que haja escorregamento entre o rolo e o concreto. O sistema permite o controle da velocidade em ambos os sentidos, no intervalo de zero à 0,5 km/h, podendo variar de forma contínua.

A movimentação vertical é possível graças à presença de um servomotor com redutor de velocidade, e se destina ao ajuste do conjunto rolo com atuador hidráulico à melhor altura para a execução das camadas de concretagem. Seu curso útil é equivalente à 1.400 mm, permitindo a execução de corpos-de-prova de até 1.200 mm de altura.

O elemento responsável pela aplicação de carga é um atuador hidráulico de alta performance, com capacidade para 15 tf, tendo acoplada servoválvula que permite a aplicação de cargas estáticas e dinâmicas de até 70 Hz. Como, durante a passagem do rolo podem ser geradas irregularidades na superfície da camada, o atuador possui um curso de 200 mm na vertical.

5.1.1 Aparato para Cura no Intervalo entre Camadas (Climatizador)

Para diminuir o ruído do sistema e simular várias condições de exposição de camadas, esta tese propôs a execução de equipamento que permite o controle de umidade e de temperatura na camada de ar superior do molde. O equipamento é executado em estrutura composta em perfilado de madeira, onde estão embutidos nebulizador e equipamento para condicionamento de ar com resfriamento e aquecimento acoplado a regulador termoestático. A Figura 5.5 mostra uma vista geral do equipamento para controle ambiental da superfície da camada, cujo desenvolvimento foi feito no Laboratório de Concreto de FURNAS pelo técnico Guilherme Leroy, ao qual o autor deste presente trabalho apresenta seus agradecimentos *in memoriam*. A Figura 5.6 apresenta detalhe do seu interior como os equipamentos de climatização embutidos, e a Figura 5.7 mostra o aparato instalado.



FIGURA 5.5 Vista Geral do Aparato para Controle Ambiental



FIGURA 5.6 Equipamento Embutido no Aparato para Controle Ambiental



FIGURA 5.7 Aparato para Controle Ambiental Instalado

5.1.2 Extração de Testemunhos

A extração de testemunhos é um processo usualmente utilizado para avaliação de obras existentes, e em obras de grande porte pode ser utilizado como balizador do sistema de garantia da qualidade. Os testemunhos têm a vantagem estratégica de testar o material com as características induzidas pelo processo construtivo, com as tensões de confinamento lateral realmente desenvolvidas no concreto. Com o desenvolvimento da técnica do CCR e com as naturais dificuldades de simular o resultado do campo em ensaios com corpos-de-prova, desenvolveu-se a prática de verificação dos resultados através de ensaios em testemunhos. A ASTM C 42/C42M-04, 2004 recomenda que a relação entre o diâmetro dos testemunhos e a Dimensão Máxima Característica dos Agregados seja, preferencialmente, superior ou igual a 3 (três). O comprimento dos corpos-de-prova também é muito importante, conforme pesquisa de BARLETT e MACGREGOR (1994), sendo desejável que as relações comprimento/diâmetro sejam superiores a 1,5. Várias normalizações nacionais e internacionais apresentam correções para os resultados de ensaio à compressão diametral para relações comprimento/diâmetros inferiores a 2,0 (ASTM C42, 2004, BS 1881, 1983 e 1988; NBR 6118, 2003).

No campo, durante a execução de uma barragem, a obtenção de testemunhos fica limitada pela possibilidade física de execução do ensaio, e pela necessidade do CCR possuir resistência mínima para que haja alguma confiabilidade no processo. Em maciços experimentais de laboratório, a extração é mais simples pela facilidade de manuseio da pista, e não há limitações geométricas para o processo. Para a validação dos resultados obtidos em laboratório, é conveniente a execução dos mesmos procedimentos utilizados em campo, com equipamentos e técnicas similares. Em termos de pesquisa, como o tamanho da amostra é importante em muitos ensaios (AHMED, 1999; MARQUES FILHO et al., 1999), a obtenção de corpos-de-prova com diferentes dimensões é possível, através de sondagem rotativa com diâmetros maiores, ou pela utilização de serras com fio diamantado. O estudo de AHMED (1999), trabalhando com concreto convencional com Dimensão Máxima Característica do agregado igual a 19 mm, obteve reduções de até 30% da resistência à compressão ao reduzir o diâmetro do testemunho de 100 mm para 75 mm. Como ao longo da superfície de corte a espessura fragilizada pelo processo de sondagem é semelhante, seu efeito seria mais pronunciado nos menores diâmetros de testemunhos. Também deve ser considerado que no desenvolvimento do concreto compactado com rolo com alto teor de finos, o consumo de aglomerante é relativamente baixo, com dimensões máximas características do agregado graúdo mais altas em relação aos concretos usuais de edificações. As zonas de transição representam a porção com menor resistência mecânica, e nos casos de CCR, são muito frágeis nas primeiras idades. O processo de corte aplica tensões laterais nas partículas dos agregados, devidas ao atrito ao longo da superfície de corte. Estes esforços aplicados nos agregados são transmitidos à zona de transição, criando a possibilidade de fissuração e decréscimo de resistência. Por conseguinte, nos ensaios em corpos-de-prova obtidos de testemunhos, a perda de resistência seria mais intensa quanto menores forem os diâmetros de extração. Também podem ocorrer diferenças geradas pelo alívio das tensões de confinamento no testemunho, e as diferenças de cura apresentada no campo em relação àquela executada em laboratório. Pela possível presença destes fenômenos, admite-se que ao coeficiente de variação obtido em programa de ensaios em testemunhos deva ser maior que programas equivalentes em corpos-de-prova moldados. Para concretos convencionais, resultados apresentados por AHMED (1999) e PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1987) mostram perdas de resistência à compressão entre 25 e 10%, respectivamente, em ensaios realizados em testemunhos em relação aos resultados em corpos-de-prova moldados.

Após a extração dos testemunhos, os mesmos devem ser usinados para que tenham dimensões que se adaptem aos limites dos ensaios de caracterização física. Em resumo, estes

dois processos aplicam esforços ao concreto, representando um ensaio de ruptura inicial no material, que pode levar a traumatismos de difícil caracterização. Para que os resultados sejam válidos, os processos de extração devem ser cuidadosos, bem como os resultados devem ser avaliados com cautela e cada testemunho avaliado meticulosamente. Baseada no acompanhamento das obras da Barragem da Derivação do Rio Jordão, da UHE Salto Caxias, da UHE Dona Francisca e na execução de maciços experimentais, a experiência do autor mostra que o início dos processos de sondagem devem aguardar entre 90 e 120 dias, outrossim haveria danos significativos nos testemunhos. Nas primeiras idades, a separação do agregado da pasta é freqüente, destruindo a superfície lateral do testemunho, bem como são comuns as rupturas de toda ao longo da seção transversal pelos esforços combinados de tração e torção.

Nos primeiros 6 (seis) maciços experimentais desta tese, foi utilizada perfuratriz elétrica com avanço manual Mach 920; e, nos demais foi utilizada Perfuratriz Hilti DD 250, que possui motor de alta desempenho com quatro velocidades variando entre 275 e 1800 rotações por minuto, e potência nominal de 2400 W. Os dois equipamentos utilizaram coroa diamantada de 6" (150 mm) acoplada a barrilete de 1,2 m de comprimento. A Figura 5.8 apresenta a plataforma para execução dos procedimentos de sondagem com a Mach 920 e detalhe da Hilti DD 250, com detalhes da perfuração ilustrados nas Figuras 5.9 e 5.10. Nesta última pode ser observada a qualidade das paredes internas dos furos de onde foram retirados os testemunhos, sendo possível perceber a diferença de textura da junta entre camadas superiores. Na seqüência final da perfuração para obtenção dos testemunhos, a Figura 5.11 mostra a retirada do mesmo do maciço.



(a) Bancada com Mach 920



(b) Hilti DD 250

FIGURA 5.8 Plataforma para Perfuração e Obtenção de Testemunhos



FIGURA 5.9 Detalhe do Início do Processo de Perfuração



FIGURA 5.10 Seqüência de Furos de Sondagem



FIGURA 5.11 Retirada do Testemunho do Furo

Os maciços experimentais em laboratório, por sua facilidade de manuseio permitem a obtenção de testemunhos horizontais, conforme apresentado na Figura 5.12, que podem ser úteis nos estudos de ligação entre camadas. A obtenção de corpos-de-prova prismáticos pode ser facilmente obtida através de corte com serra de fio diamantado, conforme Figura 5.13. Após a obtenção dos testemunhos, os mesmos são usinados, como mostrado na Figura 5.14, e capeados como apresentados na Figura 5.15 e 5.16. O processo de capeamento, em geral, utiliza a aplicação de argamassa já que em geral as irregularidades e distorções dos topos são consideráveis.



FIGURA 5.12 Extração de Testemunhos na Posição Horizontal



FIGURA 5.13 Corte com Serra de Fio Diamantado



FIGURA 5.14 Usinagem de Testemunhos para Obtenção de Corpos-de-prova



FIGURA 5.15 Aspecto dos Topos dos Corpos-de-Prova Obtidos de Testemunhos após a Usinagem

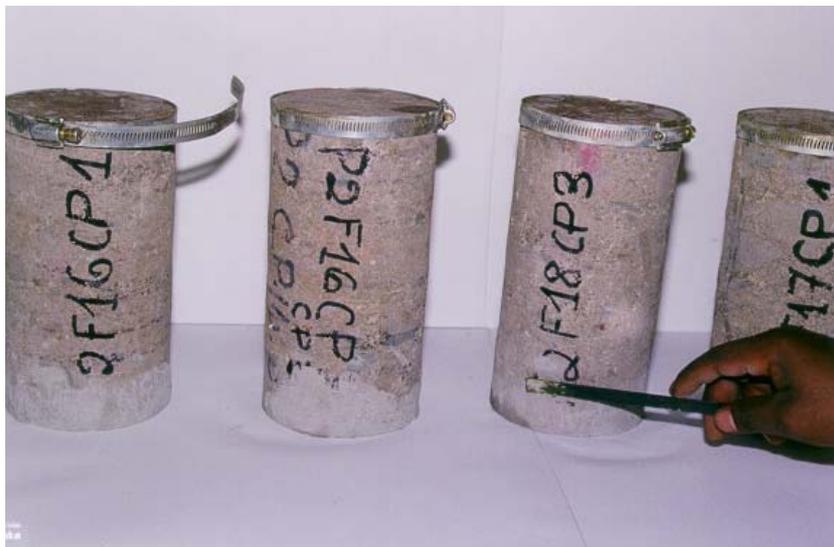


FIGURA 5.16 Acabamento nos topos dos testemunhos com argamassa

5.2 PROJETO DE EXPERIMENTOS

Para que haja confiabilidade em pesquisas desenvolvidas em maciços experimentais em laboratório, inicialmente é necessário verificar sua capacidade de reproduzir condições de campo, ou que correlações robustas entre os ensaios de campo e do laboratório possam ser obtidas. Após esta atividade inicial, pode-se realizar pesquisas, variando os diversos parâmetros controláveis na definição e projeto do material, de maneira a se avaliar sua importância relativa nos parâmetros de controle escolhidos. Para os trabalhos, como foi mencionado, foram utilizados os mesmos materiais utilizados durante a construção da barragem da UHE Dona Francisca, sendo os agregados recolhidos nas pilhas de estoque do canteiro, sendo transportados do Rio Grande do Sul para o Laboratório de Concreto de FURNAS, e o cimento comprado do mesmo fornecedor com as características especificadas para a obra. Para manter o experimento consistente, além dos materiais componentes do concreto, são utilizadas as mesmas dosagens e definições construtivas efetivamente aplicadas na construção da UHE Dona Francisca. As definições construtivas básicas consideraram a altura de camada igual 0,30 m, o *Cannon Time* com valor igual a 25 ± 5 s, a utilização de aditivo plastificante, o consumo de cimento de 90 kg/m^3 e o grau de compactação mínimo de 98%.

As juntas de concretagem representam o ponto potencialmente menos resistente e mais permeável do CCR, conforme já previamente discutido, e exaustivamente destacado nos trabalhos desenvolvidos no PROJETO NACIONAL BACARA (1997), nos trabalhos de RIBEIRO (1998 e 2002), e nos artigos de SCHRADER (1995), KOGAN e FODOSSOV (1995), DIEZ-CASCÓN (1995) e ANDRIOLO (1998). Assim sendo sua parametrização é importante para diminuição das incertezas de projeto, abrindo caminho para otimizações responsáveis.

A envoltória de resistência na seção entre camadas horizontais de concretagem depende de fatores internos, tais como processos executivos, processos de obtenção dos corpos-de-prova e dosagem, e de fatores externos que são função basicamente do meio ambiente. O projeto de experimentos aqui proposto procura criar matriz experimental para analisar os efeitos das várias situações de campo sobre os parâmetros que definem a envoltória de resistência entre camadas de CCR, assumindo que o CCR pode ser caracterizado por envoltórias de Mohr-Coulomb. Os estudos abordam ensaios em testemunhos retirados dos maciços experimentais propostos e em corpos-de-prova moldados durante sua execução. Além do experimento envolvendo a envoltória de resistência entre camadas, são propostas duas pesquisas complementares, visando avaliar possíveis ruídos do processo gerados pelo processo de obtenção de testemunhos.

5.2.1 Análise da Envoltória de Resistência entre Camadas

Para determinação da matriz experimental foram considerados fatores controláveis: o tratamento da superfície antes da colocação da próxima camada, o intervalo de tempo entre lançamentos sucessivos, a utilização de argamassa de ligação e a temperatura ambiente. Como variável controlada, tem-se a umidade do ar que sempre superior a 96%. A pesquisa inicial contempla um projeto fatorial completo, e a Tabela 5.1 mostra os fatores controláveis e os intervalos de pesquisa assumidos. Deve ser observado que, devido aos avanços existentes no novo processo de lançamento de CCR rampado que minimiza o intervalo de lançamento entre camadas, é importante a determinação do intervalo de tempo limítrofe entre camadas de concretagem sucessivas que permita a dispensa ou redução significativa da utilização da argamassa de ligação, com segurança.

TABELA 5.1 Fatores Controláveis

| FATORES CONTROLÁVEIS | | VALORES PESQUISADOS |
|------------------------------|---------------|---|
| Tratamento da Superfície (*) | | Limpeza com ar comprimido Jato de Alta Pressão |
| Uso de Argamassa de Ligação | | Com Sem |
| Intervalo de Lançamento | Sem argamassa | 0h 4h 8h 12h |
| | Com argamassa | 8h 12h 24h 48h |
| Temperatura Ambiente | | 25°C 45°C |

(*) Tarefas simuladas aproximadamente no Laboratório

A simulação dos tratamentos usuais em obra, como mostrado na Tabela 5.1, é de execução difícil em laboratório, devendo ser substituída por atividades que forneçam resultados

similares. A simulação de limpeza com jato de alta pressão foi feita através do apicoamento da superfície do topo da camada com martelete manual a ar comprimido conforme mostrado na Figura 5.17. A Figura 5.18 mostra o resultado parcial do apicoamento em metade do topo da camada, sendo que a outra metade foi tratada com limpeza com ar comprimido.



FIGURA 5.17 Apicoamento do Topo da Camada Simulando Corte com Jato de Alta Pressão

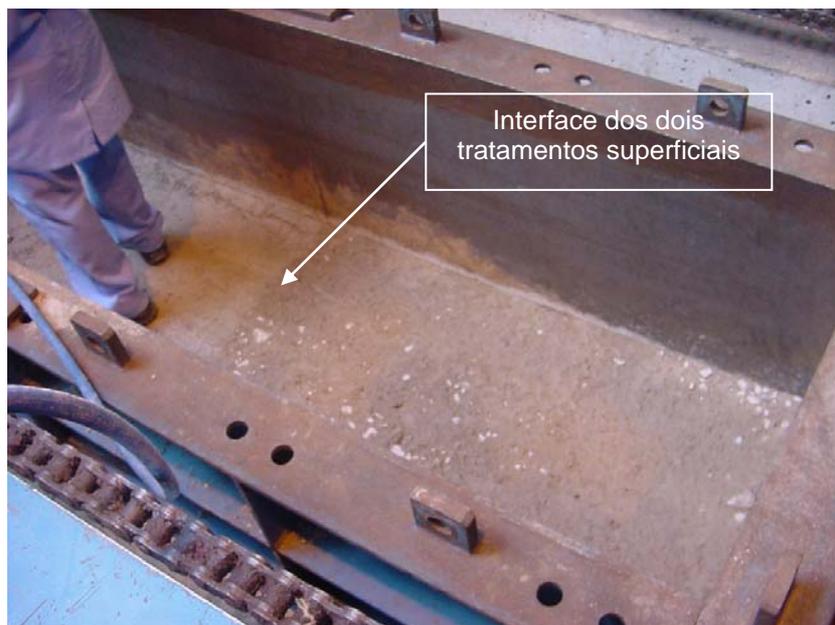


FIGURA 5.18 Vista Geral do Tratamento do Topo da Camada com a Metade da Esquerda com Limpeza com Ar Comprimido e a da Direita com Apicoamento

A pesquisa foi executada em 10 (dez) maciços experimentais com quatro camadas de lançamento, sendo a primeira com espessura de 0,20 m e as demais com 0,30 m, cujas superfícies foram tratadas com a combinação dos diversos tratamentos da Tabela 5.1. Juntamente com os ensaios de cisalhamento direto que avaliam os parâmetros das juntas, o concreto será caracterizado fisicamente com ensaios de resistência à compressão, massa específica, módulo de elasticidade, e resistência a tração direta e por compressão diametral. Estes ensaios realizados em corpos-de-prova moldados, em testemunhos cilíndricos obtidos por sondagem rotativa e em testemunhos prismáticos gerados pela aplicação de serra de fio diamantado permitem a avaliação da simulação em laboratório quando confrontados com os ensaios do campo e a avaliação da consistência do processo.

5.2.2 Avaliação da Influência da Posição Relativa dentro do Maciço Experimental – Programa Experimental Complementar I

O processo de extração pode traumatizar os testemunhos pela aplicação de esforços de torção através do atrito e esforços cortantes e momentos quando do deslocamento do testemunho nas folgas geradas quando do seu corte. O processo de remoção também gera distúrbios laterais associados aos esforços de tração decorrentes do peso próprio. Obviamente todos estes efeitos são majorados na extração de testemunhos com comprimentos mais elevados, e no caso de maciços experimentais os testemunhos têm comprimentos relativamente curtos, facilitando o seu manuseio durante a extração. Em termos de processo de sondagem, algumas dúvidas podem ser levantadas quanto a movimentação do eixo no início da perfuração e no processo final que leva a retirada do testemunho. Para avaliar se este efeito pode ser significativo e mensurado, será executado um maciço experimental, variando o sentido da perfuração.

A primeira pesquisa complementar considera a execução de maciço com quatro camadas com todas as juntas com 4h de intervalo de lançamento, sem utilização de argamassa, tratamento de superfície apenas com limpeza com ar comprimido e temperatura ambiente de 25°C. Nesta pesquisa os testemunhos são obtidos por sondagem rotativa nos dois sentidos perpendiculares às camadas de concretagem, de modo a avaliar a influência da posição relativa dos corpos-de-prova ao longo da altura de perfuração. Como produto adicional, aumenta a quantidade de resultados, e

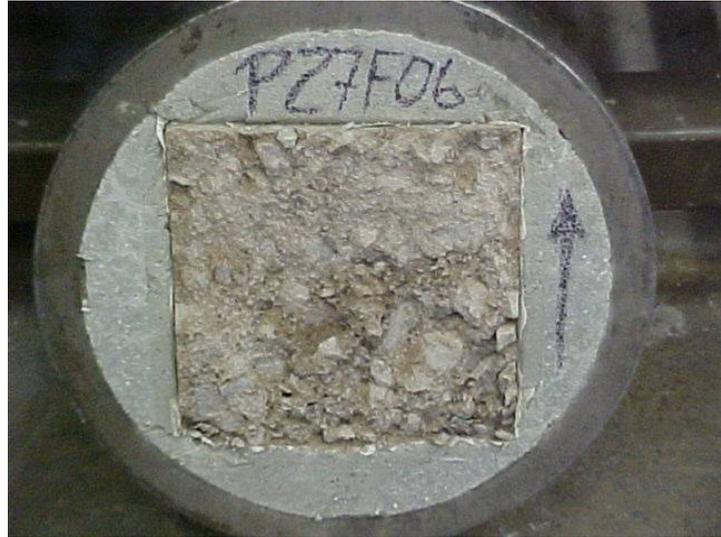
portanto sua confiabilidade, para a condição interface obtida sem a utilização de argamassa em intervalos de tempo entre concretagens sucessivas de até quatro horas. Estes resultados são importantes para aumentar a base de dados de especificações técnicas de campo, e também fornece mais subsídios para a decisão para a utilização de argamassa de ligação durante o processo de CCR rampado.

5.2.3 Estudo com Corpos-de-prova Prismáticos – Programa Experimental Complementar II

Como discutido no subitem anterior, a extração de testemunhos é por si só um processo traumático, podendo gerar um enfraquecimento da ligação entre pasta e agregado um pré-fissuramento dos testemunhos, que aliado ao processo de usinagem para obtenção dos corpos-de-prova tendem a gerar dispersão de resultados. Para tentar avaliar este efeito, foram propostos 6 (seis) maciços experimentais com duas camadas de concretagem, de modo a permitir a obtenção de testemunhos prismáticos de lado igual a 28 cm através de serra com fio diamantado, para três condições de tratamento da superfície, com 4h e 8h de intervalo de lançamento sem argamassa de ligação e 24h com utilização de argamassa de ligação, todos os casos sob temperatura ambiente de 25°C. Procurando complementar parte do estudo do Programa Experimental Complementar I, a escolha dos tratamentos visa a verificação de indicativo do intervalo de tempo máximo que não exija a obrigatoriamente a aplicação de argamassa de ligação, e a verificação de seu efeito para intervalos de tempo de 24h, que são relativamente comuns neste tipo de obra. Para balizamento dos efeitos dos traumatismos dos dois tipos de obtenção de testemunhos mencionados, serão comparados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto feitos em prismas e testemunhos cilíndricos obtidos nas mesmas pistas, utilizando o mesmo equipamento e o mesmo procedimento de ensaio, procurando se evitar a inserção de novos fatores de ruído ao processo. A limitação do tamanho do prisma utilizado no ensaio foi determinada pela câmara do equipamento de cisalhamento, considerando ainda a necessidade de preenchimento do mesmo por argamassa de alta resistência para garantir a aplicação dos esforços e a ruptura na junta de construção, conforme mostrado na Figura 5.19.



(a) Câmara de Ensaio



(b) Corpo-de-Prova Prismático Após a Ruptura

FIGURA 5.19 Corpo-de-Prova Prismático Após Ruptura e Câmara de Ensaio de Cisalhamento

5.2.4 Resumo dos Maciços Experimentais Necessários às Matrizes Experimentais

Propostas

As condições de contorno utilizadas na execução dos diversos maciços ou pistas experimentais estão resumidas na Tabela 5.2. Nesta tabela, os maciços 1 a 10 foram utilizados para as diversas combinações de parâmetros da matriz experimental do estudo da envoltória de resistência entre camadas; o maciço 14 teve por objetivo avaliar a significância do sentido de perfuração do maciço para obtenção dos testemunhos (Programa Experimental Complementar I) e o efeito do posicionamento da junta; e, os maciços 11, 12, 13, 15, 16 e 17 foram estudados para permitir avaliar os efeitos de forma e meio de obtenção dos testemunhos prismáticos e cilíndricos e corpos-de-prova para ensaio de cisalhamento direto (Programa Experimental Complementar II). Para economizar material, nos maciços 7 a 10 foram executados dois diferentes tipos de tratamento por junta, dividindo cada interface longitudinalmente pela metade.

Em todas as referências deste relatório será utilizada a nomenclatura de maciços do projeto de experimentos proposto, e as camadas serão nomeadas na seqüência de execução no maciço com numeração em algarismos romanos de I a IV.

O equipamento para compactação de CCR em laboratório teve suas atividades de pesquisa iniciadas com estudos preliminares para a UHE Dona Francisca, onde foram feitas as primeiras calibragens e treinamentos dos procedimentos de ensaio.

TABELA 5.2 Resumo dos Maciços Experimentais – Matriz Experimental

| Nº MACIÇO | JUNTAS ENTRE CAMADAS | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------------|--------|----------|-------|--------|--------|----------|-------|--------|--------|----------|-------|
| | I/II | | | | II/III | | | | III/IV | | | |
| | Δt | Argam. | Tratam. | t(°C) | Δt | Argam. | Tratam. | t(°C) | Δt | Argam. | Tratam. | t(°C) |
| 1 | s/t | s/t | s/t | s/t | 0 | s/ | Ar Compr | 25 | 0 | s/ | Ar Compr | 25 |
| 2 | s/t | s/t | s/t | s/t | 0 | s/ | Ar Compr | 25 | 4 | s/ | Ar Compr | 25 |
| 3 | s/t | s/t | s/t | s/t | 8 | s/ | Ar Compr | 25 | 12 | s/ | Ar Compr | 25 |
| 4 | s/t | s/t | s/t | s/t | 4 | s/ | Ar Compr | 45 | 8 | s/ | Ar Compr | 45 |
| 5 | s/t | s/t | s/t | s/t | 12 | s/ | Ar Compr | 45 | 8 | c/ | Ar Compr | 25 |
| 6 | s/t | s/t | s/t | s/t | 12 | c/ | Ar Compr | 25 | 24 | c/ | Ar Compr | 25 |
| 7e | 4 | s/ | Apic. | 25 | 8 | c/ | Apic. | 25 | 48 | c/ | Ar Compr | 25 |
| 7d | 4 | s/ | Apic. | 25 | 8 | s/ | Apic. | 25 | 48 | c/ | Apic. | 25 |
| 8e | 24 | c/ | Apic. | 25 | 8 | c/ | Apic. | 45 | 12 | c/ | Apic. | 25 |
| 8d | 24 | c/ | Apic. | 25 | 8 | s/ | Apic. | 45 | 12 | s/ | Apic. | 25 |
| 9e | 4 | s/ | Apic. | 45 | 48 | c/ | Ar Compr | 45 | 24 | c/ | Ar Compr | 45 |
| 9d | 4 | s/ | Apic. | 45 | 48 | c/ | Apic. | 45 | 24 | c/ | Apic. | 45 |
| 10e | 8 | c/ | Ar Compr | 45 | 12 | c/ | Ar Compr | 45 | 0 | s/ | Apic. | 25 |
| 10d | 8 | c/ | Ar Compr | 45 | 12 | c/ | Apic. | 45 | 0 | s/ | Apic. | 25 |
| 11 | 24 | c/ | Apic. | 25 | | | | | | | | |
| 12 | 24 | c/ | Apic. | 25 | | | | | | | | |
| 13 | 4 | s/ | Ar Compr | 25 | | | | | | | | |
| 14 | 4 | s/ | Ar Compr | 25 | 4 | s/ | sop. | 25 | 4 | s/ | sop. | 25 |
| 15 | 4 | s/ | Ar Compr | 25 | | | | | | | | |
| 16 | 8 | s/ | Apic. | 25 | | | | | | | | |
| 17 | 8 | s/ | Apic. | 25 | | | | | | | | |

LEGENDA

I, II, III e IV: Camadas de Concretagem, na seqüência de execução

I/II, II/III, III/IV: Juntas entre camadas sucessivas

Δt:

Intervalo de tempo entre término de uma camada e lançamento da próxima

e: Lado esquerdo da camada, colocado ao lado da numeração das camadas (ex. 8e)

d: Lado direito da camada, colocado ao lado da numeração das camadas (ex. 10d)

s/: Sem aplicação de argamassa de ligação

c/: Com aplicação de argamassa de ligação

Ar Compr. Limpeza com Ar Comprimido de baixa pressão da interface estudada

Apic. Apicoamento do topo da camada da interface estudada

5.3 ENSAIOS NOS MACIÇOS EXPERIMENTAIS

As matrizes experimentais preconizam a execução de ensaios de caracterização do CCR lançado em cada camada e das envoltórias de resistência com as variações de tratamentos propostas para a superfície da camada. Os ensaios foram feitos em corpos-de-prova moldados e em testemunhos obtidos através de perfuração rotativa ou corte com serra de fio diamantado, procurando comparar os resultados dos dois processos. Apesar da manutenção da mistura em todos os lançamentos, o seu controle da qualidade é importante para diminuir variabilidades por erro de dosagem, criando condições para a avaliação das variações existentes no processo de obtenção dos testemunhos. No estudo, foram adotados corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 15 cm e altura igual a 30 cm, exceto nos casos em que o processo de obtenção de testemunhos limitou a sua altura.

Em termos de caracterização do concreto fresco, os ensaios foram executados em todas as pistas procurando fornecer garantia da qualidade do processo e para obtenção de padrões estatísticos de variação de cada ensaio. Estes valores permitem a calibração do processo e a análise das possibilidades de sua utilização no campo com sucesso.

Em termos de continuidade do processo de aprendizado, a execução sistemática dos ensaios em todos os lançamentos permite o treinamento contínuo da mão-de-obra e abre a possibilidade de criação de banco de dados relacional contendo os resultados de todos os processos estudados no laboratório. A análise futura destes resultados talvez permita a obtenção de correlações padrões para obras de CCR para diferentes agregados ou diferentes processos de mistura. São importantes também para balizamento de futuras pesquisas com variações nos componentes do CCR.

Durante o processo de execução do concreto compactado com rolo e moldagem dos maciços experimentais, o concreto fresco é caracterizado pelos seguintes ensaios:

- Trabalhabilidade (tempo de vibração) através do consistômetro Vebe (determinando o *Cannon Time*);
- Massa unitária do CCR compactado através do aparelho de Vebe;
- Massa unitária e teor de água unitária através do Dispositivo para Determinação da Massa Unitária e Água Unitária (aparelho de DMA);
- Permeabilidade do concreto fresco utilizando permeâmetro de carga variável; e,
- Massa Específica determinada através da utilização de um Densímetro Nuclear.

Simultaneamente com a concretagem de cada camada dos maciços experimentais são moldados corpos-de-prova através de mesa vibratória para realização dos ensaios de caracterização mecânica do CCR, abaixo discriminados, juntamente com suas idades de controle.

- Resistência à compressão axial aos 07, 28, 90, 120, 180 e 365 dias;
- Resistência à tração simples aos 07, 28, 90, 120, 180 e 365 dias;
- Resistência à tração por compressão diametral aos 07, 28, 90, 120, 180 e 365 dias;
- Permeabilidade;
- Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson aos 07, 28, 90, 120, 180 e 365 dias;
- e,
- Cisalhamento direto aos 28, 90, 120, 180 e 365 dias.

Após, no mínimo, 90 dias da confecção, os maciços experimentais já possuem resistência suficiente para a extração de testemunhos via sondagem rotativa. Após sua obtenção, os testemunhos são usinados para a obtenção de corpos-de-prova para os ensaios a seguir relacionados, juntamente com suas idades de controle.

- Resistência à compressão axial (extraídas na vertical e na horizontal) aos 120 e 180 dias;
- Resistência à tração simples (extraídos na vertical, na junta e fora da mesma) aos 120 e 180 dias;
- Resistência à tração por compressão diametral (extraídos na horizontal) aos 120 e 180 dias;
- Permeabilidade (extraídos na direção vertical para caracterização do CCR matriz o maciço, e na horizontal para a junta);
- Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. aos 120 e 180 dias; e,
- Cisalhamento direto aos 120 e 180 dias.

Os testemunhos são extraídos conforme plano de extração que maximize a quantidade de testemunhos sem que haja a interferência de um furo nos demais, conforme mostrado nas Figuras 5.20 e 5.21.

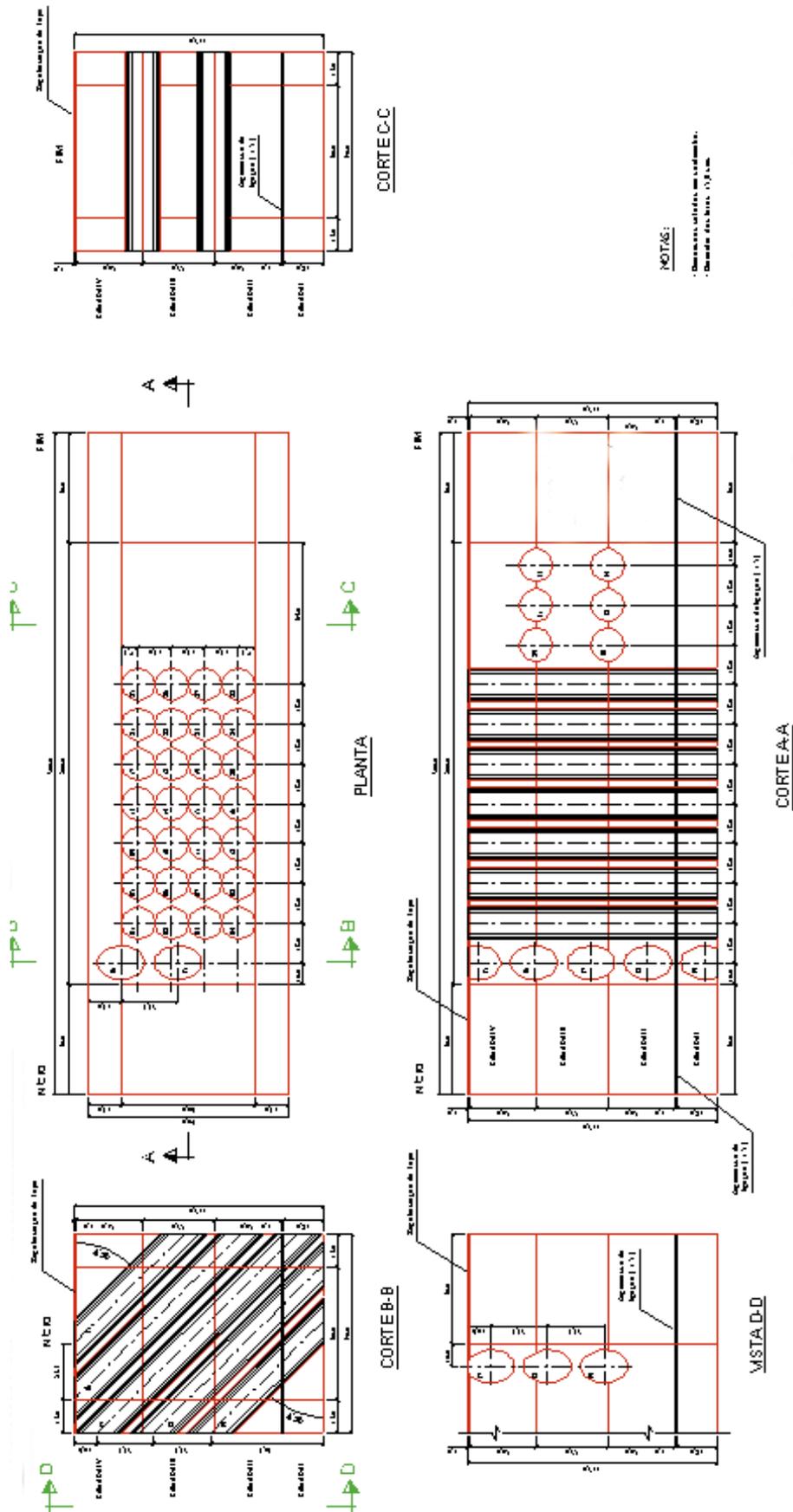
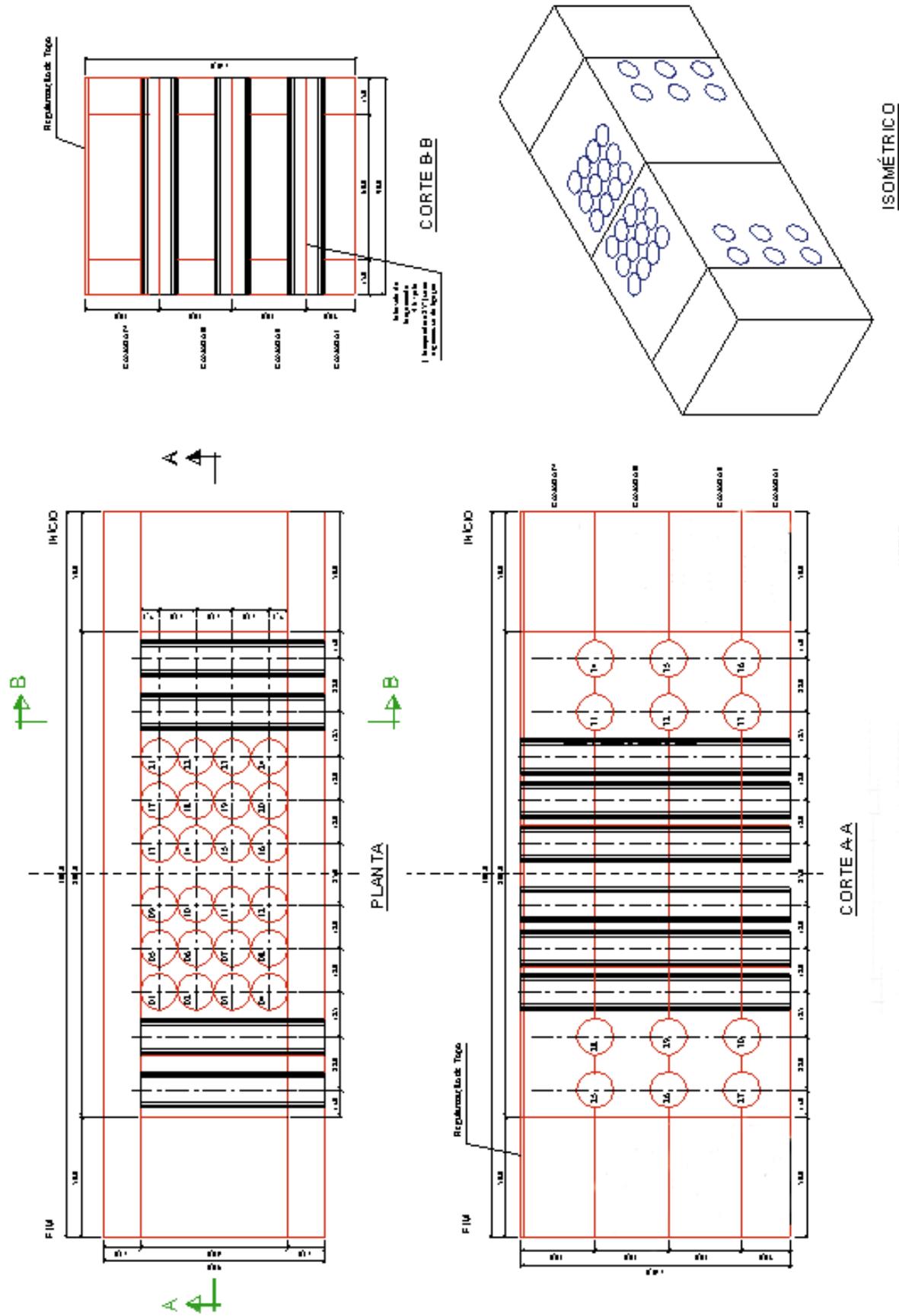


FIGURA 5.20 Plano de extração dos maciços experimentais números de 01 a 06



NOTAS:
 - Deve ser a escala em centímetros
 - Dimensão das Fitas: 150 cm

ESTUDO DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS DE CCR - PESQUISA

FIGURA 5.21 Plano de extração dos maciços experimentais números de 07 a 10

5.4 SEQÜÊNCIA DE EXECUÇÃO DOS MACIÇOS EXPERIMENTAIS

O CCR foi produzido, no Laboratório, em betoneira estacionária com capacidade para 1,5 m³. A homogeneização do concreto é feita com mini pá-carregadeira e lançado na fôrma metálica de uma altura inferior a 1,00 m.

O espalhamento foi executado manualmente e as bordas foram compactadas com compactador pneumático em duas subcamadas de 15 cm (para as camadas com 30cm de espessura). Após o espalhamento do concreto, é medida a altura da camada antes da compactação em três pontos: no terço inicial, no meio e no terço final.

Para ilustrar os procedimentos descritos ao longo da tese, e facilitar o processo de interpretação de dados, as Figuras 5.22 a 5.31 mostram a seqüência utilizada para a confecção dos maciços experimentais.



FIGURA 5.22 Pesagem dos Materiais e Abastecimento da Betoneira de 1,5 m³



FIGURA 5.23 Sala de Dosagem e Carregamento da Betoneira



FIGURA 5.24 Descarga Pós-mistura



FIGURA 5.25 Homogeneização do CCR



FIGURA 5.26 Lançamento e Espalhamento



FIGURA 5.27 Compactação das Extremidades do Maciço Experimental



FIGURA 5.28 Medição da Altura da Camada Após Compactação das Extremidades



FIGURA 5.29 Vista Geral do Equipamento no Início da Compactação



FIGURA 5.30 Execução de Furo para utilização de Densímetro Nuclear



FIGURA 5.31 Medição da Massa Específica do CCR com Utilização do Densímetro Nuclear

Entre cada camada de concretagem são realizadas as tarefas de manutenção de temperatura e umidade através do aparato já mostrado na Figura 5.7, e executadas imediatamente, antes de nova concretagem, a preparação da junta como ilustrados nas Figuras 5.17 e 5.18.

Após 7 dias da confecção da última camada, os maciços são desformados lateralmente com o auxílio de duas pontes rolantes com capacidade de 10 tf cada uma, disponíveis no edifício do laboratório. O processo de desforma e o aspecto final do maciço experimental de CCR estão ilustrados nas Figuras 5.32 e 5.33.

Após os procedimentos de desforma, os maciços experimentais são estocados em câmara úmida, com umidade relativa do ar acima de 96% e temperatura ambiente de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, por um período mínimo de 30 dias. Todo o processo de manuseio é auxiliado pela utilização de pontes rolante, e a câmara úmida possui teto basculante para entrada dos diversos maciços experimentais, conforme mostrado nas Figuras 5.34 e 5.35.



FIGURA 5.32 Desforma da Maciço Experimental



FIGURA 5.33 Continuação da Desforma com Auxílio da Ponte Rolante



FIGURA 5.34 Colocação na Câmara Úmida



FIGURA 5.35 Vista Geral da Estocagem na Câmara Úmida

A campanha de extração de testemunhos deve ser iniciada após 90 dias de idade, no mínimo, considerando a execução nos sentidos horizontal e vertical para a caracterização das propriedades do CCR, conforme planejamento de experimento proposto. A extração dos testemunhos e o corte com fio diamantado têm sua seqüência ilustrada nas Figuras 5.36 a 5.39.



FIGURA 5.36 Vista geral da extração



FIGURA 5.37 Retirada de testemunho



FIGURA 5.38 Corte com fio diamantado



FIGURA 5.39 Vista da seção transversal

5.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais (cimento, aditivo, agregado graúdo e agregado miúdo) foram recolhidos na obra e em seus fornecedores e transportados para Goiânia onde foram caracterizados física e quimicamente. Para a caracterização, foram seguidas as Normas Brasileiras vigentes durante a execução do protótipo e dos maciços experimentais em laboratório, permitindo a comparação dos resultados e mantendo a coerência do processo.

5.5.1 Cimento

Para a realização dos estudos de dosagens de CCR, argamassa e confecção das pistas experimentais em laboratório, foi utilizado o cimento CP IV-32, o qual foi submetido aos ensaios de caracterização mostrados na Tabela 5.3. nos traços considerados, a adição de cinza volante corresponde aproximadamente a 35% do peso de cimento.

TABELA 5.3 Caracterização de Cimento

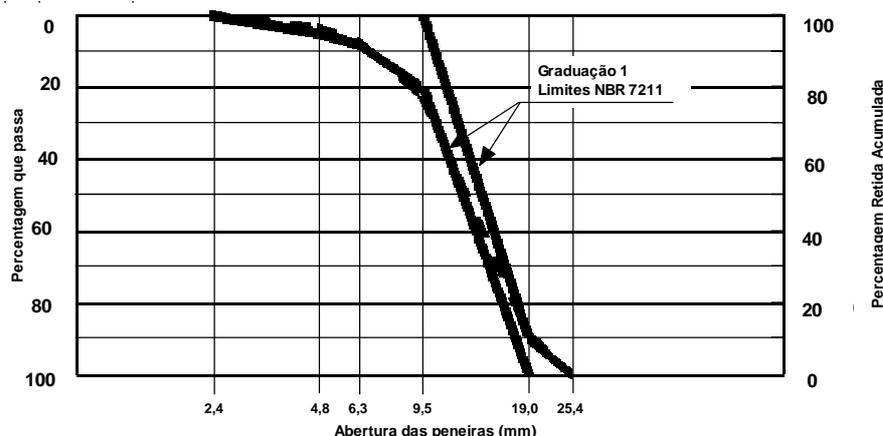
| PROPRIEDADES DETERMINADAS CP IV-32 | | Registro | Limite NBR 5736/91 | |
|---------------------------------------|---|--|-----------------------|-----|
| Massa específica (g/cm ³) | | 2,73 | --- | |
| Finura | Resíduo na peneira 200 (%) | 0,5 | ≤ 8,0 | |
| | Resíduo na peneira 325 (%) | 3,6 | --- | |
| | Área específica (cm ² /g) | 4.020 | --- | |
| Tempo de Pega (h:min) | Início | 3:40 | ≥ 1:00 | |
| | Fim | 5:50 | ≤ 12:00 | |
| Água de Consistência - Pasta (%) | | 32,2 | --- | |
| Expansão em Autoclave (%) | | 0,1 | --- | |
| Resistência à Compressão (MPa) | 3 dias | 15,1 | ≥ 10,0 | |
| | 7 dias | 20,7 | ≥ 20,0 | |
| | 28 dias | 32,6 | ≥ 32,0 ≤ 49,0 | |
| | 91 dias | 46,5 | ≥ 40,0 | |
| Componentes Químicos (%) | Perda ao fogo | 3,49 | ≤ 4,5 | |
| | Resíduo insolúvel | 35,98 | --- | |
| | Trióxido de enxofre (SO ₃) | 2,30 | ≤ 4,0 | |
| | Óxido de magnésio (MgO) | 5,60 | ≤ 6,5 | |
| | Dióxido de silício (SiO ₂) | 37,40 | --- | |
| | Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃) | 3,39 | --- | |
| | Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) | 8,31 | --- | |
| | Óxido de cálcio (CaO) | 37,08 | --- | |
| | Óxido de cálcio livre (CaO) | 0,90 | --- | |
| | Álcalis | Óxido de sódio (Na ₂ O) | 0,09 | --- |
| | | Óxido de potássio (K ₂ O) | 1,70 | --- |
| | Totais | Equiv. alcalino | 1,21 | --- |
| | | Sulfato de cálcio (CaSO ₄) | 3,91 | --- |

5.5.2 Agregado Graúdo e Miúdo

Os ensaios realizados para a caracterização do agregado graúdo e miúdo do tipo litológico basalto são apresentados na Tabela 5.4, e nas Figuras 5.40 a 5.42:

TABELA 5.4 Caracterização dos Agregados

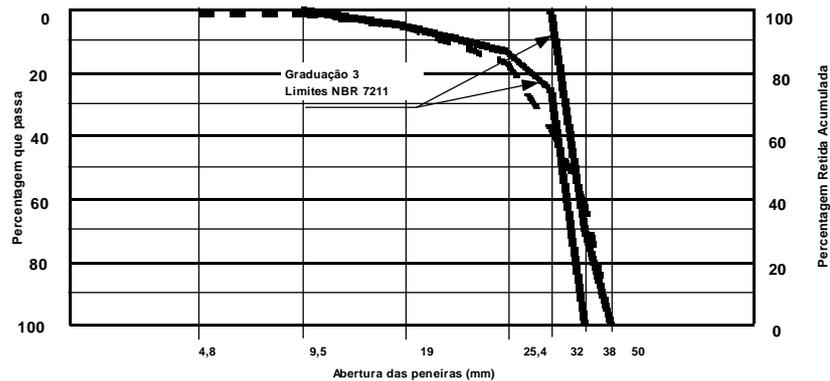
| Método Utilizado | | Propriedades Determinadas | Basalto 25 mm | Basalto 50 mm | Areia Artificial |
|------------------|---------|--|------------------|------------------|---------------------|
| Norma | Proced. | | | | |
| NBR-9937/87 | 1.02.03 | Absorção (%) | 1,11 | 0,79 | 1,30 |
| NBR-7217/87 | 1.02.09 | Granulometria (M.F.) | 6,85 | 8,31 | 2,95 |
| NBR-9937/87 | 1.02.03 | Massa Específica S.S.S.(g/cm ³) | 2,84 | 2,83 | 2,81 |
| NBR-7251/82 | 1.02.05 | Massa Unitária – Estado Solto (g/m ³) | 1,52 | 1,46 | 1,71 |
| NBR-7809/83 | 1.02.10 | Índice de Forma (c/e) | 2,8 | 2,7 | --- |
| NBR-7219/87 | 1.02.12 | Teor de Material Pulverulento (%) | --- | --- | 20,36 |



| Peneiras | | 1a. determinação | | | 2a. determinação | | | % ret. acum. médio | Limites NBR 7211 | |
|----------------|------|------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|--------------------|--------------------|-----|
| nº | mm. | massa retida(g) | % retida indiv. | % ret. acumul. | massa retida(g) | % retida indiv. | % ret. acumul. | | % retida acumulada | |
| 1" | 25,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0 |
| 3/4" | 19,0 | 730,0 | 10,2 | 10,2 | 1040,0 | 12,5 | 12,5 | 11,4 | 0 | 10 |
| 3/8" | 9,5 | 4760,0 | 66,7 | 76,9 | 5400,0 | 65,1 | 77,6 | 77,3 | 80 | 100 |
| 1/4" | 6,3 | 1110,0 | 15,5 | 92,4 | 1240,0 | 15,0 | 92,6 | 92,5 | 92 | 100 |
| 3/16" | 4,8 | 270,0 | 3,8 | 96,2 | 320,0 | 3,9 | 96,5 | 96,4 | 95 | 100 |
| Fundo | | 270,0 | 3,8 | 100,0 | 290,0 | 3,5 | 100,0 | 100,0 | 100 | 100 |
| 8 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| 16 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| 30 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| 50 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| 100 | 0,15 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| Fundo | | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| Massa Total(g) | | 7140,0 | ----- | ----- | 8290,0 | ----- | ----- | ----- | | |
| Mód. de finura | | 6,83 | | | 6,87 | | | ----- | | |

Módulo de finura médio: 6,85

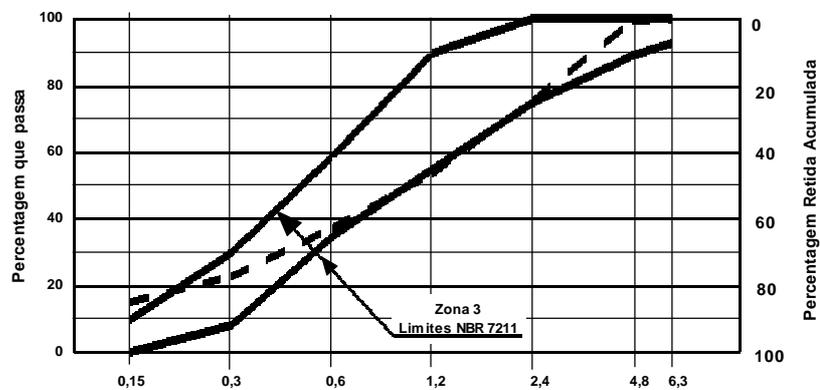
FIGURA 5.40 Curva Granulométrica do Agregado Graúdo Basalto 25 mm



| Peneiras | | 1a. determinação | | | 2a. determinação | | | %ret. acum. médio | Limites NBR 7211 | |
|-----------------|------|------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------|-------------------|-----|
| nº | mm. | massa retida(g) | % retida indiv. | % ret. acumul. | massa retida(g) | % retida indiv. | % ret. acumul. | | %retida acumulada | |
| 2" | 50 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 30 |
| 1 1/2" | 38 | 7260,0 | 40,5 | 40,5 | 7580,0 | 37,7 | 37,7 | 39,1 | 75 | 100 |
| 1 1/4" | 32 | 4120,0 | 23,0 | 63,5 | 4750,0 | 23,7 | 61,4 | 62,5 | 87 | 100 |
| 1" | 25,4 | 3450,0 | 19,3 | 82,8 | 4450,0 | 22,2 | 83,6 | 83,2 | 95 | 100 |
| 3/4" | 19 | 2170,0 | 12,1 | 94,9 | 2200,0 | 11,0 | 94,6 | 94,8 | | |
| 3/8" | 9,5 | 710,0 | 4,0 | 98,9 | 780,0 | 3,9 | 98,5 | 98,7 | | |
| 3/16" | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 98,9 | 0,0 | 0,0 | 98,5 | 98,7 | | |
| Fundo | | 200,0 | 1,1 | 100,0 | 300,0 | 1,5 | 100,0 | 100,0 | | |
| 8 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| 16 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| 30 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| 50 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| 100 | 0,15 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| Fundo | | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| Massa Total (g) | | 17910,0 | ----- | ----- | 20060,0 | ----- | ----- | ----- | | |
| Mód. de finura | | 8,33 | | | 8,29 | | | ----- | | |

Módulo de finura médio: 8,31

FIGURA 5.41 Curva Granulométrica do Agregado Graúdo Basalto 50 mm



| Peneiras | | 1a. determinação | | | 2a. determinação | | | % ret. acum. médio | Limites NBR 7211 Zona 3 (Areia Média) | |
|----------------|------|------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|--------------------|---------------------------------------|----|
| nº | mm. | massa retida(g) | % retida indiv. | % ret. acumul. | massa retida(g) | % retida indiv. | % ret. acumul. | | % retida acumulada | |
| 3/8 | 9,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 7 |
| 1/4 | 6,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 11 |
| 4 | 4,8 | 2,3 | 0,3 | 0,3 | 2,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0 | 25 |
| 8 | 2,4 | 203,0 | 23,4 | 23,7 | 201,3 | 24,6 | 24,9 | 24,3 | 10 | 45 |
| 16 | 1,2 | 184,3 | 21,3 | 45,0 | 182,6 | 22,3 | 47,2 | 46,1 | 41 | 65 |
| 30 | 0,6 | 140,8 | 16,2 | 61,2 | 137,8 | 16,8 | 64,0 | 62,6 | 70 | 92 |
| 50 | 0,3 | 140,8 | 16,2 | 77,4 | 102,9 | 12,5 | 76,5 | 77,0 | | |
| 100 | 0,15 | 67,8 | 7,8 | 85,2 | 66,0 | 8,0 | 84,5 | 84,9 | | |
| Passa (fundo) | | 128,2 | 14,8 | 100,0 | 127,3 | 15,5 | 100,0 | 100,0 | | |
| Massa Total(g) | | 867,2 | ----- | ----- | 820,2 | ----- | ----- | ----- | | |
| Mód. de finura | | 2,93 | | | 2,97 | | | ----- | | |

Módulo de finura médio: 2,95

FIGURA 5.42 Curva Granulométrica da areia artificial

5.6 DOSAGENS DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR) E ARGAMASSAS.

5.6.1 Concreto compactado com rolo

Esta pesquisa foi desenvolvida utilizando um dos traços utilizados na barragem de Dona Francisca, conforme Tabela 5.5, que foi reavaliado para a aferição da dosagem utilizada na confecção dos maciços experimentais, de forma a aumentar a segurança do processo. Na confecção do CCR foram determinadas as seguintes propriedades do concreto fresco:

- Tempo de vibração (*Cannon Time*)
- Massa específica do concreto (Vebe, DMA)
- Permeabilidade do concreto fresco
- Umidade do CCR (integral e peneirado)

TABELA 5.5 Traço Utilizado para a Confecção dos Maciços Experimentais.

| MATERIAL | CONSUMO (kg/m ³) |
|---|------------------------------|
| Cimento | 90 |
| Água | 143 |
| Areia | 1083 |
| Brita1 | 679 |
| Brita2 | 553 |
| Aditivo Plastificante Retardador (Master mix 282R) | 1,08 |
| <i>Cannon Time</i> (s) | 20 a 30 |
| Grau de compactação (%) | > 98 |
| Resistência Característica Requerida aos 180 dias (MPa) | 7,5 |

5.6.2 Argamassa

A de argamassa utilizada entre as camadas da pista experimental de CCR tinha as seguintes características mostradas na Tabela 5.6.

TABELA 5.6 Traço Utilizado para a Argamassa de Ligação

| MATERIAL | CONSUMO (kg/m ³) |
|--|------------------------------|
| Consumo de Cimento | 326 kg/m ³ |
| Consumo de Água | 299 kg/m ³ |
| Areia | 1630 kg/m ³ |
| Aditivo Plastificante Retardador (Master mix 282R) | 3,26 kg/m ³ |
| Relação água/cimento (a/c) | 0,91 |

6 RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS PARA A MATRIZ EXPERIMENTAL PROPOSTA

Neste capítulo estão apresentados os principais resultados obtidos no programa experimental proposto, bem como uma análise da coerência e consistência dos mesmos. A apresentação dos resultados de ensaio será segregada por parâmetros de interesse para facilitar sua compreensão e comparação.

Inicialmente serão comparados os resultados de corpos-de-prova moldados no campo e no laboratório, e os dados obtidos nos ensaios equivalentes em corpos-de-prova gerados por testemunhos retirados de maciços experimentais e do protótipo da barragem da UHE Dona Francisca. Os parâmetros neste caso serão as resistências à compressão, à tração direta, à tração por compressão diametral, que são usuais nos processos de controle de qualidade deste tipo de empreendimento. Estes ensaios juntamente com a determinação dos parâmetros de deformação do concreto, ensaios de permeabilidade e caracterização do concreto fresco são usuais e possíveis de comparação entre o modelo de laboratório e os resultados de obras.

Os ensaios de cisalhamento serão apresentados separadamente para os três subprogramas experimentais propostos. Sempre estão sob desconfiança os efeitos do tamanho do corpo-de-prova, seu tamanho relativo com relação Dimensão Máxima Característica do Agregado, o efeito de confinamento do ensaio, e o tipo de superfície de ruptura forçado. Estas questões incitam ao confronto conceitual entre características dos ensaios de cisalhamento direto com àquelas dos ensaios triaxiais. FLEURY et al., em 2004, comparou resultados dos dois ensaios para CCR com consumo de aglomerante de 70 kg/m^3 , e 11 s de *Cannon Time*, obtendo envoltórias de resistências muito semelhantes, nos níveis de tensão usuais para este tipo de obra. Pela simplicidade de execução e maior disponibilidade de dados na bibliografia, o ensaio de cisalhamento direto será utilizado nesta tese, utilizando três resultados com tensões normais diferentes para a obtenção da envoltória de Mohr-Coulomb, conforme sugerido por HESS, 1999, apud FLEURY et al., 2004.

6.1 RESULTADOS DOS CORPOS-DE-PROVA MOLDADOS PARA CONTROLE DOS MACIÇOS EXPERIMENTAIS

Conforme descrito anteriormente, juntamente com a execução dos maciços experimentais em laboratório foi efetuado controle de qualidade do concreto, através da moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de 15cm de diâmetro por 30cm de altura, que permitem uma comparação com os resultados obtidos durante o controle de qualidade da obra, descritos em MOSER et al., em 2003.

6.1.1 Resultados do Programa Experimental

Os ensaios de caracterização foram realizados para todos os dez maciços experimentais correspondentes à Análise da Envoltória de Resistência entre Camadas, descrita no item 5.1.4.

Nos programas complementares de pesquisa, para efeito de controle de qualidade do concreto, foram previstos ensaios de resistência à compressão e de massa específica em corpos-de-prova moldados. A Tabela 6.1 apresenta os resultados obtidos para todos os maciços, nestes ensaios, bem como o estudo estatístico simples dos resultados segregados pela idade de controle. Esta análise mostra a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação por parâmetro e por idade. Os resultados de massa específica mostram variações muito baixas, resultado totalmente esperado para este tipo de grandeza.

Completando os ensaios apresentados, foram propostos ensaios de determinação da resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração direta e do módulo de elasticidade, cujos valores estão também apresentados na Tabela 6.1.

Analisando os resultados de resistência à compressão, os valores dos coeficientes de variação são compatíveis com resultados de obras de concreto massa, sendo os desvios maiores aos 28 dias que aos 90 dias. O desvio padrão para 120 dias é relativamente maior que os demais, e pode ser explicado pela pequena quantidade de ensaios executados. Os resultados mostrados na Tabela 6.1 ilustram o ganho de resistência lento do material com a idade, mostrando acréscimos

significativos até 120 dias de idade. A Figura 6.1 mostra a variação da resistência com o tempo, onde se pode observar um crescimento de resistência de 80% entre os 28 e os 90 dias, e um crescimento de 21% depois desta última idade até os 180 dias.

TABELA 6.1 Resultados de Ensaios de Compressão, Massa Específica, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Resistência à Tração Direta e Módulo de Elasticidade para Corpos-de-Prova Moldados

| GRANDEZA | | | IDADE DE CONTROLE (dias) | | | | |
|---|----------------|----------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 7 | 28 | 90 | 120 | 180 |
| Resistência à Compressão | Média | (MPa) | 2,33 | 4,53 | 8,32 | 9,90 | 10,71 |
| | Desvio Padrão | (MPa) | 0,24 | 0,76 | 0,66 | 2,08 | 0,96 |
| | Coef. Variação | (%) | 10 | 17 | 8 | 21 | 9 |
| | número ensaios | - | 8 | 23 | 17 | 3 | 12 |
| Massa Específica | Média | (kg/m ³) | 2524 | 2542 | 2538 | 2525 | 2539 |
| | Desvio Padrão | (kg/m ³) | 17 | 14 | 15 | 8 | 25 |
| | Coef. Variação | (%) | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | número ensaios | - | 5 | 20 | 17 | 4 | 14 |
| Resistência à Tração por Compressão Diametral | Média | (MPa) | 0,23 | 0,64 | 1,24 | 1,43 | 1,68 |
| | Desvio Padrão | (MPa) | 0,07 | 0,07 | 0,10 | 0,23 | 0,16 |
| | Coef. Variação | (%) | 30 | 11 | 8 | 16 | 9 |
| | número ensaios | - | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 |
| Resistência à Tração Direta | Média | (MPa) | 0,18 | 0,42 | 0,77 | 0,98 | 1,11 |
| | Desvio Padrão | (MPa) | 0,07 | 0,10 | 0,08 | 0,12 | 0,07 |
| | Coef. Variação | (%) | 40 | 25 | 10 | 12 | 6 |
| | número ensaios | - | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Módulo de Elasticidade | Média | (GPa) | 5,60 | 16,88 | 24,51 | 33,56 | 34,40 |
| | Desvio Padrão | (GPa) | 2,76 | 5,41 | 4,84 | 4,74 | 4,69 |
| | Coef. Variação | (%) | 49 | 32 | 20 | 14 | 14 |
| | número ensaios | - | 5 | 5 | 3 | 4 | 4 |

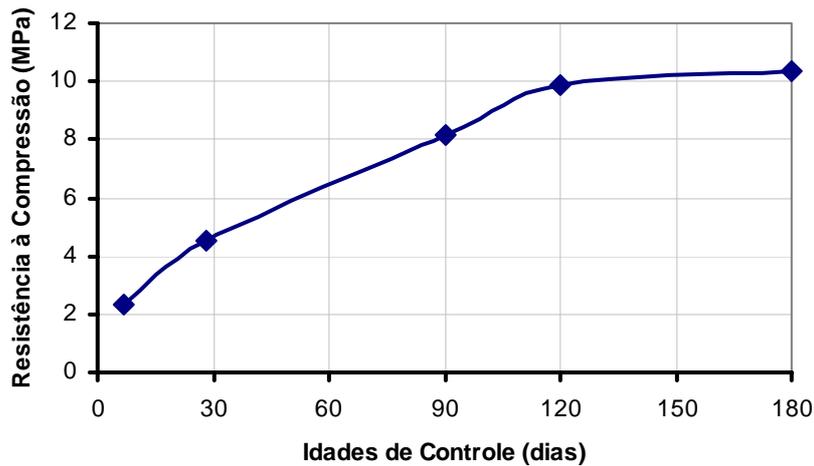


FIGURA 6.1 Variação da Resistência à Compressão com o Tempo dos Corpos-de-Prova Moldados com a Idade

Os resultados das variações das resistências à tração e do módulo de elasticidade são relativamente pequenos para idades superiores a 90 dias, com coeficientes de variação muito inferiores aos obtidos em RIBEIRO et al. (1998), significando, provavelmente, uma melhoria nos procedimentos de ensaio em relação àquele estudo. A Tabela 6.2 indica a relação entre os valores de resistência à tração direta e aqueles obtidos no ensaio de compressão diametral, mostrando que a resistência à tração direta é em torno de 65% do valor obtido nos ensaios propostos por Lobo Carneiro, para idades superiores aos 28 dias. A Figura 6.2 mostra a variação da resistência à tração no tempo, para os dois tipos de ensaios realizados.

Analisando a relação entre as resistências à tração e a compressão, mostradas na Tabela 6.3, verifica-se que as razões apresentam um comportamento muito semelhante, com ligeiro acréscimo relativo das resistências à tração em relação à resistência à compressão com o tempo. A partir dos 28 dias, apesar de crescentes, as relações são similares, sendo a resistência à tração por compressão diametral em torno de 15% da resistência à compressão, e a resistência à tração direta em torno de 10% daquela última. A primeira relação é semelhante ao trabalho de RIBEIRO et al., 1998, que apresentou um valor em torno de 13%, com materiais semelhantes aos utilizados nesta tese.

TABELA 6.2 Relação entre Resistências à Tração Direta e por Compressão Diametral para Corpos-de-Prova Moldados

| IDADE (dias) | RELAÇÃO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA/COMPRESSÃO DIAMETRAL |
|--------------|--|
| 7 | 79% |
| 28 | 65% |
| 90 | 63% |
| 120 | 68% |
| 180 | 66% |

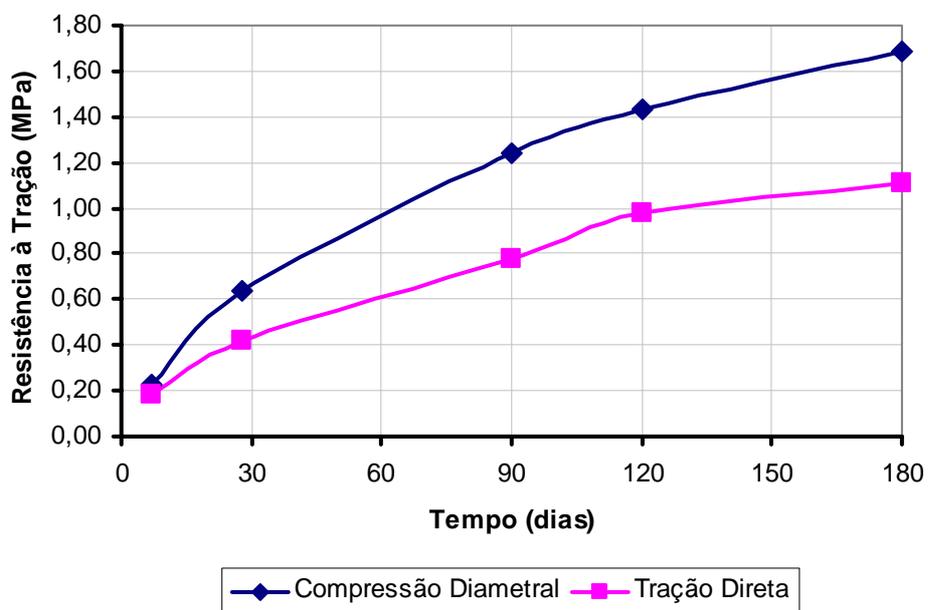


FIGURA 6.2 Variação da Resistência à Tração dos Corpos-de-Prova Moldados com a Idade

TABELA 6.3 Relação entre Resistência à Tração e Resistência à Compressão para Corpos-de-Prova Moldados

| IDADE (dias) | TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL/ RESIST. À COMPRESSÃO (%) | TRAÇÃO DIRETA/RESIST. À COMPRESSÃO (%) |
|-----------------|---|--|
| 7 | 9,8 | 7,7 |
| 28 | 14,1 | 9,2 |
| 90 | 15,2 | 9,5 |
| 120 | 14,4 | 9,9 |
| 180 | 16,2 | 10,7 |

A Figura 6.3 apresenta a variação do módulo de elasticidade no tempo para os corpos-de-prova moldados do programa experimental. O módulo de elasticidade apresenta um crescimento intenso entre os 7 e os 28 dias (202% em 21 dias), diminuindo significativamente o crescimento de rigidez até os 90 dias (45% em 62 dias). A partir desta data, os resultados apresentam um crescimento expressivo de 37% em 30 dias, não sendo significativas as diferenças após esta idade.

Comparando, na figura 6.4, os quatro parâmetros de caracterização mecânica estudados em relação aos seus valores aos 28 dias, verifica-se crescimentos relativos menores para o módulo de elasticidade, e crescimento relativamente consideráveis nas resistências à tração após os 120 dias.

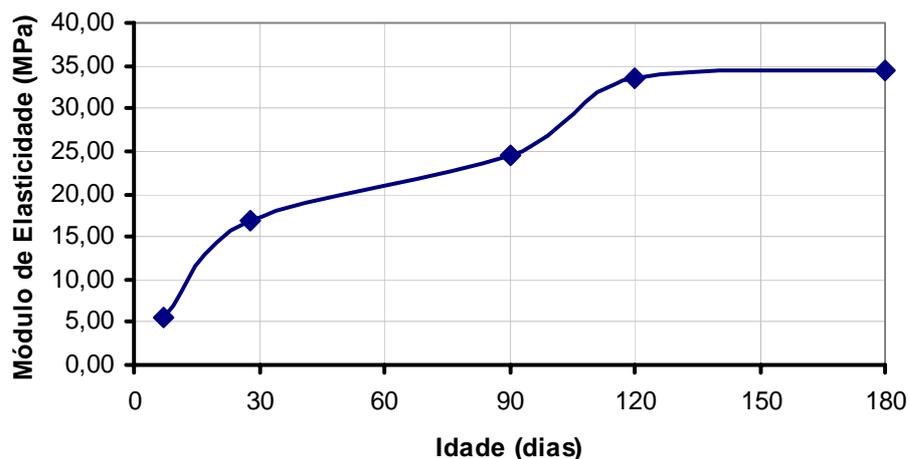


FIGURA 6.3 Evolução do Módulo de Elasticidade com o Tempo

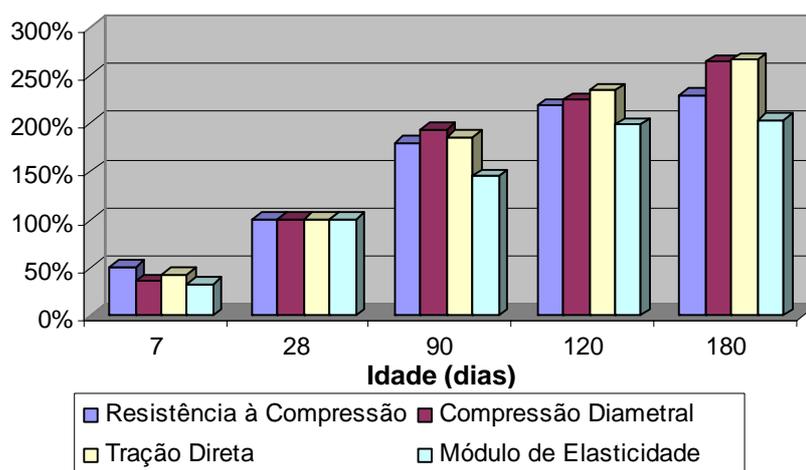


FIGURA 6.4 Variação dos Parâmetros no Tempo em Relação aos Resultados aos 28 dias – Resistências à Compressão e à Tração; e, Módulo de Elasticidade

Completando os resultados dos corpos-de-prova moldados, durante a execução dos maciços, foram, também controladas a massa específica e a quantidade total de água através de densímetro nuclear, cujos resultados estão discriminados na Tabela 6.4. Os resultados da massa específica formam uma ferramenta importante para o controle de qualidade do processo, sendo utilizado no campo o controle do grau de compactação do CCR.

GRAÇA et al. (2004), pesquisaram a influência do grau de compactação em CCR com alto teor de finos, utilizando agregado proveniente de granito, onde se verifica a importância do

grau de compactação nas propriedades mecânicas do concreto, mostrando a importância de seu controle preciso e eficaz. Os resultados mostram uma convergência dos parâmetros para graus de compactação crescentes, inclusive nos resultados de análises em testemunhos.

TABELA 6.4 Medidas do Densímetro Nuclear - Maciços Experimentais em Laboratório

| PISTA | Cam. | Massa Específica (kg/m ³) | | | | Consumo de Água (kg/m ³) | | | |
|-------------|------|---------------------------------------|------|------|------|--------------------------------------|-------|-------|-----|
| | | Profundidade(mm) | | | | Profundidade(mm) | | | |
| 1 | I | 50 | 100 | 150 | 200 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| | II | 2506 | 2555 | 2561 | | 157 | 163,3 | 153,8 | |
| | III | | 2505 | 2540 | 2538 | | 173 | 165 | 165 |
| | IV | | 2549 | 2572 | 2564 | | 163 | 158 | 162 |
| 2 | I | 2506 | 2555 | 2561 | | 157 | 163,3 | 153,8 | |
| | II | | 2481 | 2531 | 2547 | | 169 | 178 | 173 |
| | III | | 2489 | 2507 | 2543 | | 168 | 173 | 170 |
| | IV | | 2523 | 2524 | 2540 | | 179 | 179 | 179 |
| 3 | I | | 2490 | 2552 | 2534 | | 168 | 155 | 171 |
| | II | | 2505 | 2540 | 2538 | | 173 | 165 | 165 |
| | III | | 2514 | 2540 | 2523 | | 168 | 175 | 159 |
| | IV | | 2556 | 2525 | 2514 | | 176 | 175 | 175 |
| 4 | I | | 2518 | 2518 | 2552 | | 158 | 158 | 167 |
| | II | | 2499 | 2508 | 2562 | | 170 | 164 | 172 |
| | III | | 2474 | 2506 | 2542 | | 162 | 158 | 157 |
| | IV | | 2474 | 2522 | 2592 | | 154 | 162 | 154 |
| 5 | I | | 2490 | 2552 | 2534 | | 168 | 155 | 171 |
| | II | | 2485 | 2514 | 2539 | | 175 | 182 | 179 |
| | III | | 2549 | 2572 | 2564 | | 163 | 158 | 162 |
| | IV | | 2511 | 2538 | 2577 | | 181 | 174 | 174 |
| 6 | I | | 2511 | 2528 | - | | 171 | 174 | - |
| | II | | 2536 | 2523 | 2516 | | 173 | 170 | 168 |
| | III | | 2550 | 2563 | 2528 | | 179 | 178 | 184 |
| | IV | | 2530 | 2533 | 2536 | | 180 | 177 | 175 |
| 7 | I | 2485 | 2495 | 2503 | | 170 | 169 | 165 | |
| | II | | 2542 | 2566 | 2552 | | 183 | 189 | 187 |
| | III | | 2491 | 2519 | 2507 | | 161 | 168 | 163 |
| | IV | | | | | | | | |
| 8 | I | | 2550 | 2520 | 2521 | | 170 | 162 | 164 |
| | II | | 2531 | 2506 | - | | 178 | 183 | - |
| | III | | 2535 | 2556 | 2527 | | 190 | 192 | 190 |
| | IV | | 2514 | 2546 | 2528 | | 174 | 182 | 174 |
| 9 | I | | 2504 | 2532 | 2525 | | 182 | 184 | 186 |
| | II | | 2558 | 2540 | 2526 | | 182 | 189 | 184 |
| | III | | 2507 | 2574 | 2530 | | 192 | 186 | 189 |
| | IV | | 2524 | 2524 | 2538 | | 163 | 165 | 165 |
| 10 | I | | 2543 | 2549 | | | 182 | 179 | |
| | II | | 2508 | 2505 | 2526 | | 188 | 178 | 184 |
| | III | | 2512 | 2552 | 2506 | | 177 | 177 | 161 |
| | IV | | 2544 | 2566 | 2566 | | 173 | 171 | 173 |
| 11 | I | | 2577 | 2549 | | | 176 | 178 | |
| | II | | 2510 | 2529 | 2583 | | 185 | 175 | 170 |
| | III | | | | | | | | |
| | IV | | | | | | | | |
| 12 | I | | 2508 | 2526 | 2538 | | 177 | 175 | 174 |
| | II | | 2504 | 2546 | 2565 | | 173 | 172 | 175 |
| | III | | | | | | | | |
| | IV | | | | | | | | |
| 13 | I | | 2520 | 2522 | 2595 | | 188 | 179 | 180 |
| | II | | 2501 | 2543 | | | 158 | 167 | |
| | III | | | | | | | | |
| | IV | | | | | | | | |
| Média | | 2499 | 2519 | 2536 | 2542 | 161 | 173 | 172 | 172 |
| Desvio Pad. | | 12 | 25 | 20 | 22 | 8 | 9 | 10 | 9 |
| Coef. Var. | | 0% | 1% | 1% | 1% | 5% | 5% | 6% | 5% |

6.1.2 Resistência à Compressão – Controle da Qualidade no Protótipo

Durante a execução da UHE Dona Francisca, o sistema de controle da qualidade monitorou as resistências do CCR através de corpos-de-prova moldados, cujos resultados nas idades de controle utilizadas estão dispostos na Tabela 6.5, para o traço de concreto em análise.

A mesma tabela mostra a relação entre os resultados de programa experimental e do controle de qualidade do protótipo.

TABELA 6.5 Resultados de Ensaios de Resistência à Compressão para Corpos-de-Prova Moldados e Comparação com seus Equivalentes dos Maciços em Laboratório

| GRANDEZA | | | IDADE DE CONTROLE (dias) | | | | |
|---|----------------|-------|--------------------------|-----|------|-----|------|
| | | | 7 | 28 | 90 | 120 | 180 |
| Resistência à Compressão | Média | (MPa) | 2,5 | 4,8 | 8,6 | -- | 11,2 |
| | Desvio Padrão | (MPa) | 0,3 | 0,4 | 1,03 | -- | 1,32 |
| | Coef. Variação | (%) | 12 | 8 | 12 | -- | 12 |
| | número ensaios | - | 26 | 26 | 26 | 0 | 26 |
| RELAÇÃO PROGRAMA EXPERIMENTAL / PROTÓTIPO (%) | | | 93 | 94 | 95 | -- | 96 |

6.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS EM TESTEMUNHOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DA ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA ENTRE CAMADAS

O estudo da envoltória de resistência entre camadas segue o programa experimental proposto no item 5.1.4, cujos fatores controláveis estão dispostos na Tabela 5.1. Os ensaios para caracterização dos parâmetros de resistência ao cisalhamento da seção foram executados em testemunhos obtidos dos diversos maciços experimentais propostos, seguindo o programa de

extração de testemunhos apresentado no item 5.1.7.1, que foram posteriormente usinados para obtenção de corpos-de-prova necessários aos procedimentos experimentais.

A validação do projeto de experimentos deve considerar a eficiência e consistência da simulação em laboratório, bem como verificar os efeitos dos processos de obtenção de testemunhos e de sua usinagem. Nesta análise, foram executados, nos testemunhos, os mesmos ensaios para caracterização física dos corpos-de-prova moldados, visando comparar os parâmetros resultantes destas duas baterias de ensaios com os dados do controle de qualidade da obra.

Verificada a semelhança entre os comportamentos materiais do protótipo e dos maciços experimentais compactados em laboratório, são determinadas as envoltórias de resistência para cada uma das combinações dos tratamentos experimentais estudados. Estes parâmetros são determinados através de ensaios de cisalhamento direto, e posteriormente são comparados com os resultados dos programas complementares de pesquisa, bem como com alguns dados disponíveis nas referências bibliográficas existentes.

6.2.1 Ensaios para Determinação das Resistências à Compressão e à Tração, Massa Específica e Módulo de Elasticidade

De maneira semelhante ao desenvolvido anteriormente para os corpos-de-prova moldados, a Tabela 6.6 mostra os resultados médios de resistência à compressão, massa específica, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração direta e de módulo de elasticidade, acompanhada dos desvios padrão e dos coeficientes de variação. Como os testemunhos necessitam de espera mínima de 90 dias para os processos de sondagem rotativa, foram estudadas as idades de controle de 120, 180 e 365 dias.

TABELA 6.6 Resistências à Compressão e à Tração, Massa Específica e Módulo de Elasticidade para Testemunhos

| GRANDEZA | | IDADE DE CONTROLE (dias) | | |
|---|------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
| | | 120 | 180 | 365 |
| Resistência à Compressão | Média (MPa) | 6,65 | 7,80 | 8,78 |
| | Desvio Padrão (MPa) | 1,31 | 1,26 | 2,05 |
| | Coef. Variação (%) | 20 | 16 | 23 |
| | número ensaios | 44 | 45 | 14 |
| Massa Específica | Média (kg/m ³) | 2517 | 2519 | 2513 |
| | Desvio Padrão (kg/m ³) | 17 | 40 | 43 |
| | Coef. Variação (%) | 1 | 2 | 2 |
| | número ensaios | 46 | 37 | 20 |
| Resistência à Tração por Compressão Diametral | Média (MPa) | 1,23 | 1,07 | 1,00 |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,31 | 0,3 | 0,29 |
| | Coef. Variação (%) | 25 | 28 | 29 |
| | número. ensaios | 11 | 12 | 3 |
| Resistência à Tração Direta | Média (MPa) | 0,74 | 0,6 | 0,48 |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,26 | 0,2 | 0,25 |
| | Coef. Variação (%) | 35 | 34 | 53 |
| | número ensaios | 15 | 17 | 8 |
| Módulo de Elasticidade | Média (GPa) | 12,13 | 13,00 | 12,15 |
| | Desvio Padrão (GPa) | 3,6 | 4,59 | 4,9 |
| | Coef. Variação (%) | 30 | 35 | 40 |
| | número ensaios | 40 | 37 | 14 |
| Permeabilidade | Média (m/s) | 2,23E-10 | | |
| | Desvio Padrão (m/s) | 1,85E-10 | | |
| | Coef. Variação (%) | 86 | | |
| | número ensaios | 99 | | |

As Tabelas 6.7 e 6.8 mostram, respectivamente as relações entre Resistência à Tração e à Compressão, e entre a Resistência à Tração por compressão diametral e a tração direta. Na idade de controle de 365 dias os resultados mostram valores relativamente menores, que podem ser explicados pela menor quantidade de ensaios realizados. Os resultados mostram uma sensibilidade maior do ensaio de tração direta no processo de extração, mantendo-se aproximadamente a relação entre resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão aos 120 dias.

TABELA 6.7 Relação entre Resistências à Tração Direta e por Compressão Diametral para Testemunhos

| IDADE (dias) | RELAÇÃO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA/COMPRESSÃO DIAMETRAL (%) |
|--------------|--|
| 120 | 60% |
| 180 | 56% |
| 365 | 48% |

TABELA 6.8 Relação entre Resistência à Tração e Resistência à Compressão para Testemunhos

| IDADE (dias) | TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL/ RESIST. À COMPRESSÃO (%) | TRAÇÃO DIRETA/RESIST. À COMPRESSÃO (%) |
|--------------|---|--|
| 1128 | 18 | 11 |
| 180 | 14 | 8 |
| 365 | 11 | 5 |

6.2.2 Ensaios de Cisalhamento Direto

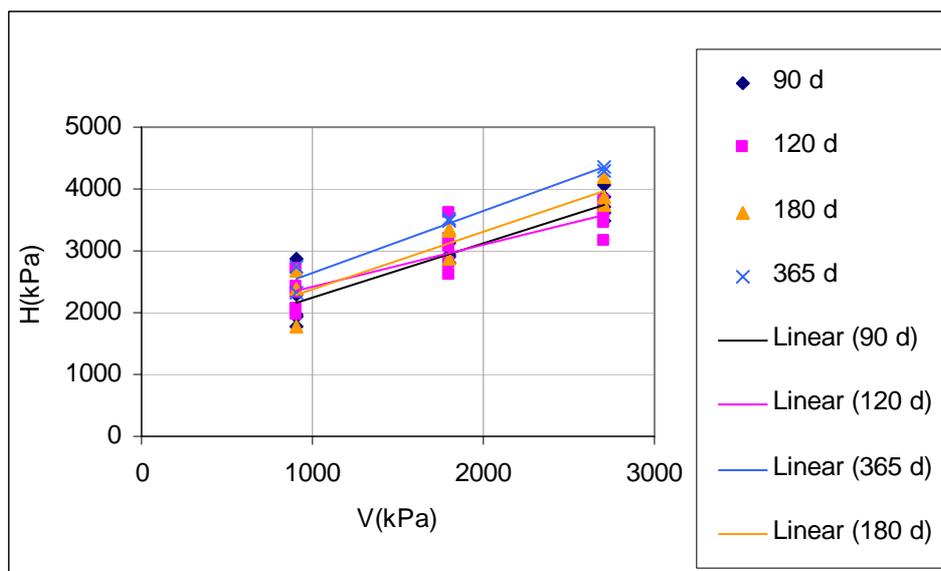
Os ensaios de cisalhamento direto foram executados seguindo o Procedimento FURNAS Nº 03.011.001, utilizando a seqüência de atividades e o equipamento descrito no Capítulo 3. A obtenção da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb considera ensaios para determinação das resistências tangenciais sob três valores de tensão normal, adotando-se os valores 900 kPa, 1800 kPa e 2700 kPa.

As envoltórias de Mohr-Coulomb para cada simulação da matriz experimental podem ser determinadas através de regressões lineares simples dos resultados. Cabe aqui uma reflexão sobre estes resultados, lembrando que os testemunhos são muito sensíveis aos processos de

obtenção, conforme já discutido neste documento, e a ligação entre camadas deve ser potencialmente a região mais atingida. As regressões lineares determinadas a partir de apenas três níveis de tensão podem ser muito sensíveis em relação a pequenos desvios de parâmetros, naturais nos ensaios. Os resultados devem ser analisados com cautela, verificando a existência de valores espúrios, gerados por alguma não conformidade do ensaio ou por uma deterioração mais intensa dos parâmetros de resistência mecânica da interface entre camadas sucessivas. Como os ensaios são demorados e muito caros, a quantidade de repetições considerada foi relativamente pequena, permitindo uma avaliação através dos gráficos de envoltórias de resistência de tendências comportamentais.

6.2.2.1 Maciço de CCR fora da Junta

Antes da análise dos parâmetros de resistência das juntas, se faz necessário caracterizar o maciço de CCR fora das juntas. Estes valores têm função extremamente importante no processo, fornecendo um valor para balizamento às análises com os diversos processos de tratamento das juntas entre camadas. A envoltória de resistência de Mohr-Coulomb foi determinada a partir de 15 conjuntos de ensaios de cisalhamento direto, sendo analisadas as idades de controle de 90, 120, 180 e 365 dias, cujos resultados estão apresentados na Figura 6.5, com os resultados de coesão e ângulo de atrito mostrados na Tabela 6.9.



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.5 Envoltórias de Resistência para as Várias Idades do Maciço de CCR

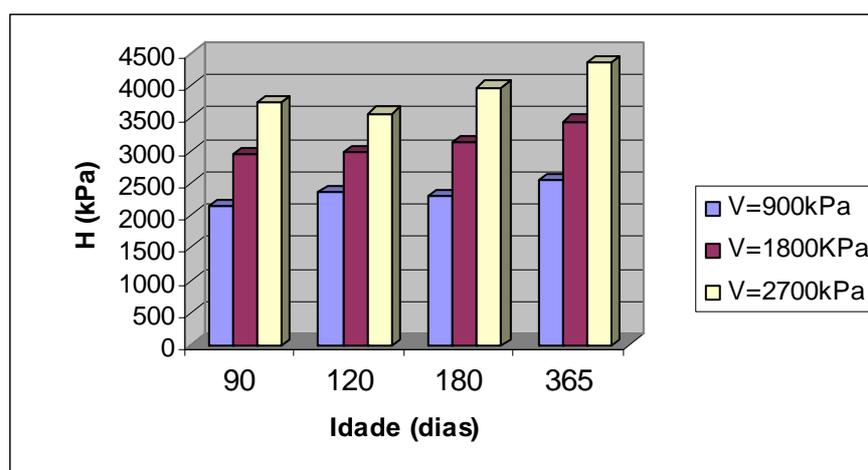
TABELA 6.9 Valores de Coesão e Ângulo de Atrito para as Várias Idades do Maciço de CCR

| IDADE DE CONTROLE (dias) | COESÃO (kPa) | ÂNGULO DE ATRITO (graus) | R ² |
|--------------------------|--------------|--------------------------|----------------|
| 90 | 1359 | 41,5 | 0,8650 |
| 120 | 1732 | 34,3 | 0,7580 |
| 180 | 1468 | 42,9 | 0,8620 |
| 365 | 1646 | 45,1 | 0,9706 |

Os dados mostram que há um aumento da resistência mecânica ao cisalhamento com o aumento do nível de tensão normal, como esperado. A comparação fora deste domínio fica relativamente prejudicada pela sensibilidade dos parâmetros da reta em relação às variabilidades existentes. Utilizando as correlações da Tabela 6.9 para os valores de tensão normal 900, 1800 e 2700 kPa, obtém-se um parâmetro para comparação neste intervalo de tensões. Estes resultados estão apresentados na Tabela 6.10 e na Figura 6.6, que apresenta um acréscimo potencial em torno de 15% na capacidade resistente entre os 120 e os 365 dias e em torno de 6% entre os 90 e 180 dias. Estes incrementos são inferiores aos obtidos para as resistências à tração e à compressão, fato esperado pela influência significativa crescente do ângulo de atrito em relação à coesão no processo.

TABELA 6.10 Tensões de Cisalhamento para as Tensões Normais de Ensaio Obtidas das Correlações

| IDADE (dias) | TENSÃO NORMAL (kPa) | | |
|--------------|---------------------|------|------|
| | 900 | 1800 | 2700 |
| 90 | 2155 | 2951 | 3747 |
| 120 | 2346 | 2960 | 3575 |
| 180 | 2303 | 3138 | 3973 |
| 365 | 2547 | 3449 | 4351 |



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.6 Comparação dos Valores de Esforços Resistentes ao Cisalhamento Obtidos das Correlações nas Várias Idades

6.2.2.2 Análise da Envoltória de Experimento entre Camadas – Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto

A Tabela 6.11 fornece os valores de resistência médios obtidos durante o estudo da matriz experimental proposta. Em todos os ensaios foram analisadas as curvas tensão de cisalhamento em função do deslocamento horizontal, para avaliação da correção do processo e determinar a eventualidade de alguma não conformidade. Por uma questão de brevidade, estes gráficos não serão apresentados.

Para facilitar a interpretação, os resultados estão apresentados em blocos, permitindo sua rápida comparação visual. Inicialmente, foram segregados os dados em mesmos eventos, variando-se apenas a presença ou não da argamassa de ligação, em intervalos de tempo de lançamento variando de 0 a 12 horas. O objetivo desta abordagem é permitir avaliar sucintamente a deterioração dos parâmetros de resistência ao longo do tempo sem a utilização de argamassa de ligação, bem como o efeito da utilização desta nas ligações entre juntas.

TABELA 6.11 Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto (kPa)

| | | TRATAMENTO DA JUNTA ENTRE CAMADAS | | | | | | | | | | | |
|----|-------|-----------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|------|------|------|
| | | AR COMPRIMIDO | | | | | | APICOAMENTO | | | | | |
| | | 25°C | | 45°C | | 25°C | | 45°C | | 25°C | | 45°C | |
| Δt | Id.c. | 900 | 1800 | 2700 | 900 | 1800 | 2700 | 900 | 1800 | 2700 | 900 | 1800 | 2700 |
| 0 | 120 | 1875 | 2790 | 2812 | << | << | << | 1796,5 | 2291 | 3226 | << | << | << |
| | 180 | 2023 | 3000 | 3433 | << | << | << | 1743 | 2439 | 3442 | << | << | << |
| | 365 | 1275 | 2236 | 3219 | | | | | | | | | |
| 4 | 120 | | | | 1482 | 3000 | 3150 | 1546 | 2437 | 2749 | | | |
| | 180 | 1714 | 2501 | 3116,5 | x | 2696 | 3165 | 1800,5 | 2499,5 | 2984,5 | | | |
| | 365 | | | | 1856 | 3089 | 2765 | | | | | | |
| 8 | 120 | 1964 | 2954 | 4004 | 1751 | 2343 | 2648 | << | << | << | 1193 | 2937 | 3777 |
| | 180 | 1702 | 3200 | 4214 | 1768 | 2523 | 2954 | << | << | << | 1708 | 2280 | 3122 |
| | 365 | | | | 1622 | 2210 | 2835 | | | | | | |
| 12 | 120 | 1569 | 1814 | 3094 | 1291 | 1864 | 2947 | | | | | | |
| | 180 | 1135 | 2686 | 2732 | 1439 | 2234 | 2913 | 1257 | 2576 | 2853 | | | |
| | 365 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 120 | 1921 | 2723 | 3494 | 2572,5 | 2951,5 | 3577,5 | 1822 | 2575 | 3158 | 2308 | 2103 | 3896 |
| | 180 | 1909 | 3417 | 3424 | 2431 | 3033 | 3628 | 1602 | 2222 | 3028 | s | s | s |
| | 365 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 120 | 1589 | 3141 | 2910 | 2647 | 3155 | 3809 | 1885 | 2911 | 3872 | 1821 | 3182 | 4160 |
| | 180 | 1855 | 2066 | 2541 | 2269 | 3485 | 4191 | 1828 | 2797 | 3264 | 1899 | 3448 | 3868 |
| | 365 | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 120 | << | 2670 | 3164 | 1425 | 2585 | 3280 | 2245 | 2767,5 | 3535 | 1916 | 2798 | 3632 |
| | 180 | 2481 | 2824 | 3676 | 1695 | 3198 | 3943 | 2194,5 | 3179 | 3813,5 | 1942 | 2900 | 3705 |
| | 365 | | | | | | | | | | | | |
| 48 | 120 | 1903 | 2630 | 3973 | 1974 | 2357 | 2738 | 2043 | 2526 | 3348 | 2185 | 2948 | 4111 |
| | 180 | 2319 | 3480 | 4027 | 1427 | 2537 | 4253 | 2003 | 2493 | 3225 | 2155 | 2945 | 3292 |
| | 365 | | | | | | | | | | | | |

Notas: Resultados apresentados em KPa

Δt: Intervalo de tempo entre concretagens sucessivas

Id.c.: Idade de Controle para efeito de ruptura dos corpos-de-prova

Não está marcada a Legenda de temperatura que foi indicada com a unidade °C, abaixo de cada um dos tratamentos mecânicos da superfície superior das camadas antes da próxima concretagem

Estes resultados estão representados nas Figuras 6.7 a 6.14, e a Tabela 6.12 apresenta os valores obtidos de coesão, ângulo de atrito e coeficiente de correlação R^2 .

Para simplificar a visualização dos resultados, e em consequência a comparação relativa de resultados, em todas as figuras, representando as envoltórias de resistência, e tabelas correspondentes adota-se a seguinte nomenclatura:

- Idade: Intervalo de tempo em dias decorrido entre a concretagem da última camada e a execução propriamente dita do ensaio

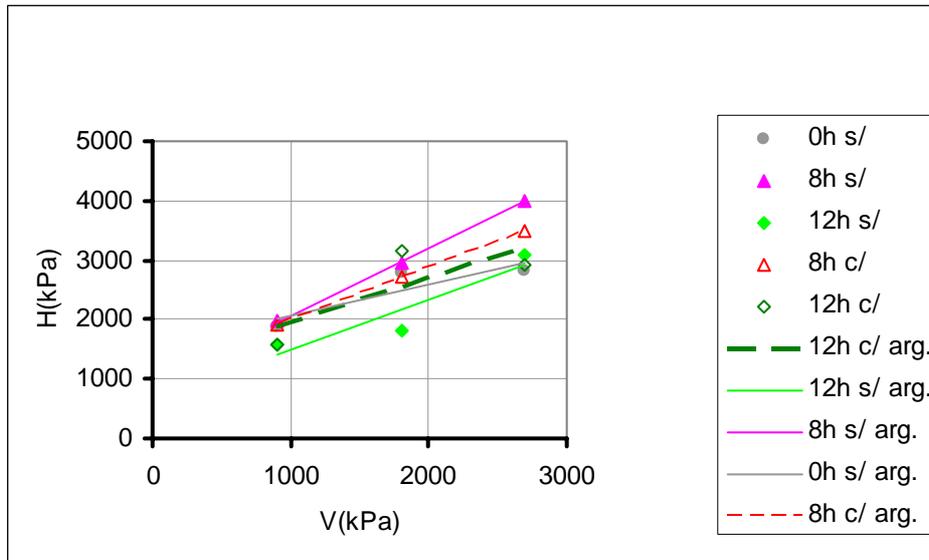
- Trat. Superf.: Tratamento de superfície procurou simular em laboratório o tratamento mecânico da superfície da camada existente antes da concretagem.
 - Ar Compr.: Limpeza com ar comprimido sem corte com alta pressão
 - Apic. ou Apicoam.: A camada foi apicoada removendo grande parte da nata superior

- Argamassa: O estudo considerou dois tratamentos para este parâmetro:
 - s/ : Não foi utilizada argamassa de ligação entre as camadas
 - c/ : Foi utilizada argamassa de ligação entre camadas

- Tempo: Os intervalos de tempo entre o término de uma camada e o início da execução da camada imediatamente subsequente são medidos em horas e a notação empregada apresenta numericamente o intervalo de tempo seguido pela letra h. Exemplo: 4h

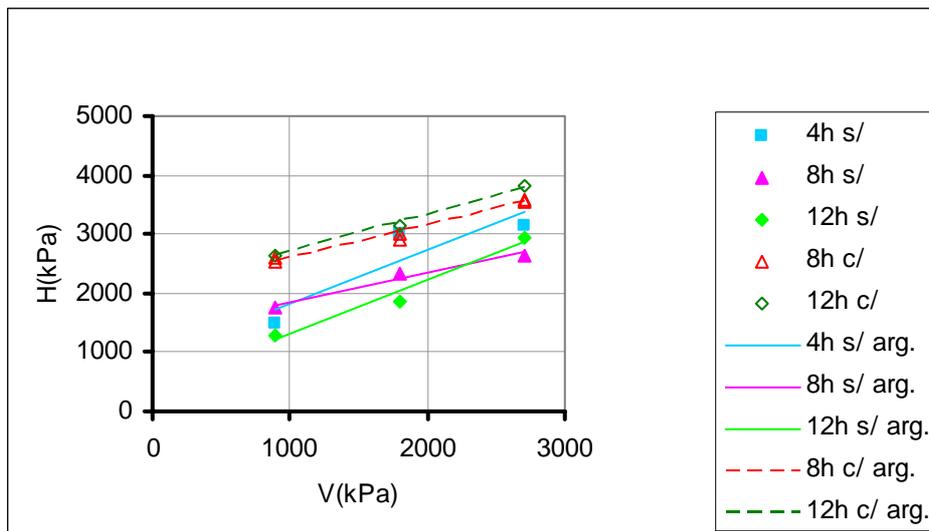
TABELA 6.12 Parâmetros das Envoltórias de Resistência para a Análise da Envoltória de Resistência entre Camadas com Intervalo de Tempo Inferiores a 12h

| IDADE (dias) | LIMPEZA | TRAT. | 25°C | | | 45°C | | |
|-----------------|----------|--------|-----------------|-----------------------------|--------|-----------------|-----------------------------|--------|
| | | | COESÃO (kPa) | ÂNGULO ATRITO (graus) | R2 | COESÃO (kPa) | ÂNGULO ATRITO (graus) | R2 |
| 120 | Ar Compr | 0h s/ | 1.555 | 27,5 | 0,7676 | xx | xx | xx |
| | | 4h s/ | xx | xx | xx | 876 | 42,8 | 0,8169 |
| | | 8h s/ | 934 | 48,6 | 0,9997 | 1.350 | 26,1 | 0,967 |
| | | 12h s/ | 634 | 40,3 | 0,8669 | 378 | 42,6 | 0,9694 |
| | | 8h c/ | 1.140 | 41,2 | 0,9999 | 2.029 | 29,2 | 0,9694 |
| | | 12h c/ | 1.226 | 36,3 | 0,6222 | 2.042 | 32,8 | 0,9948 |
| | Apicoam. | 0h s/ | 1.008 | 38,5 | 0,7987 | xx | xx | xx |
| | | 4h s/ | 1.041 | 33,8 | 0,9283 | xx | xx | xx |
| | | 8h s/ | xx | xx | xx | 1.257 | 39,8 | 1 |
| | | 8h c/ | 1.182 | 36,6 | 0,9946 | 1.514 | 41,4 | 1 |
| | | 12h c/ | 902 | 47,8 | 0,9996 | 1257 | 52,4 | 0,9911 |
| | | | | | | | | |
| 180 | Ar Compr | 0h s/ | 1.555 | 27,5 | 0,7676 | xx | xx | xx |
| | | 4h s/ | xx | xx | xx | 1.014 | 39,7 | 0,9557 |
| | | 8h s/ | 527 | 54,4 | 0,9878 | 1.229 | 33,4 | 0,9757 |
| | | 12h s/ | 587 | 41,6 | 0,7716 | 721 | 39,3 | 0,9979 |
| | | 8h c/ | 1.402 | 40,1 | 0,7535 | 1.834 | 33,6 | 1 |
| | | 12h c/ | 1.468 | 20,9 | 0,953 | 1.393 | 46,9 | 0,9771 |
| | Apicoam. | 0h s/ | 842 | 43,3 | 0,9566 | xx | xx | xx |
| | | 4h s/ | 1244 | 33,3 | 0,9115 | xx | xx | xx |
| | | 12h s/ | 633 | 41,6 | 0,8756 | xx | xx | xx |
| | | 8h s/ | xx | xx | xx | 956 | 38,2 | 0,988 |
| | | 8h c/ | 858 | 38,4 | 0,9944 | xx | xx | xx |
| | | 12h c/ | 1194 | 38,6 | 0,9609 | 1103 | 47,6 | 0,9012 |
| | | | | | | | | |



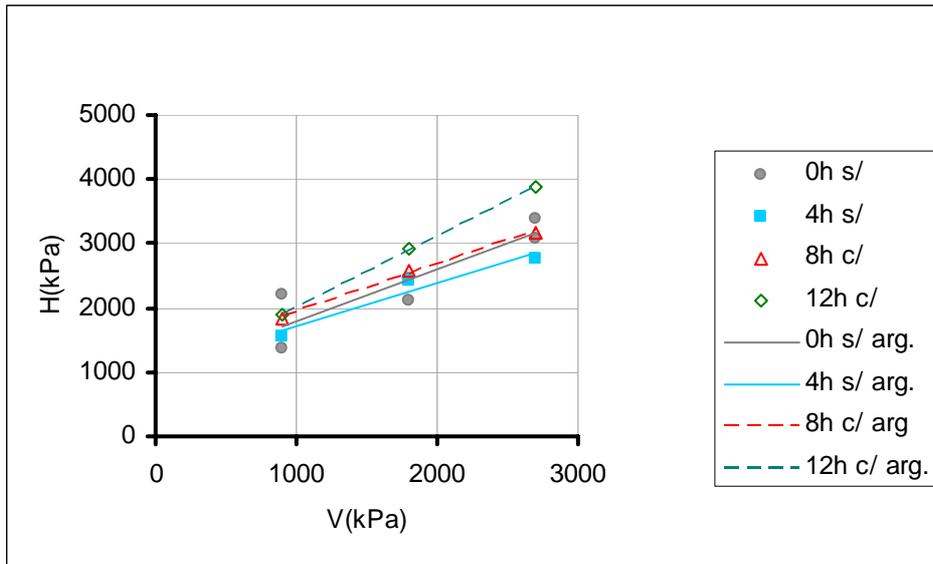
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.7 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Limpeza com Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 25°C



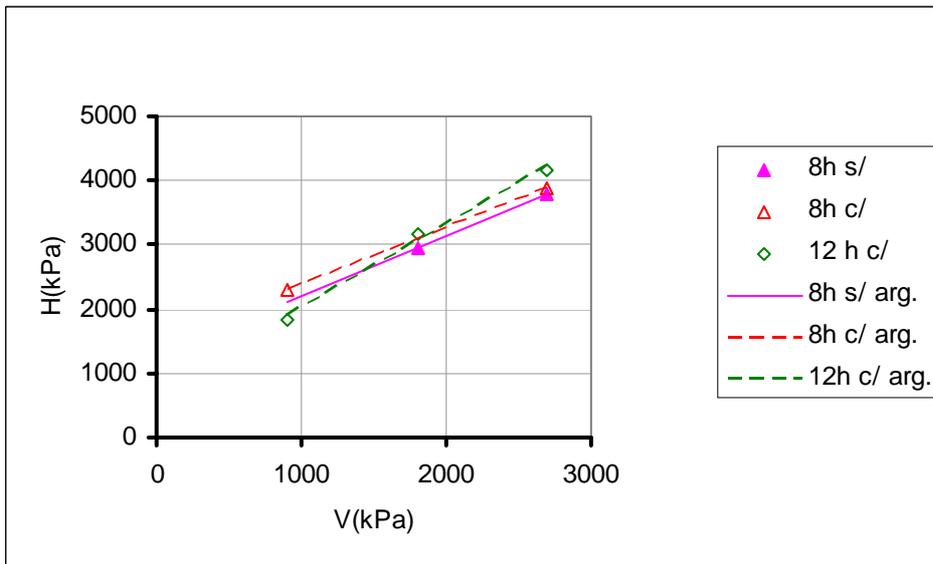
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.8 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Limpeza com Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 45°C



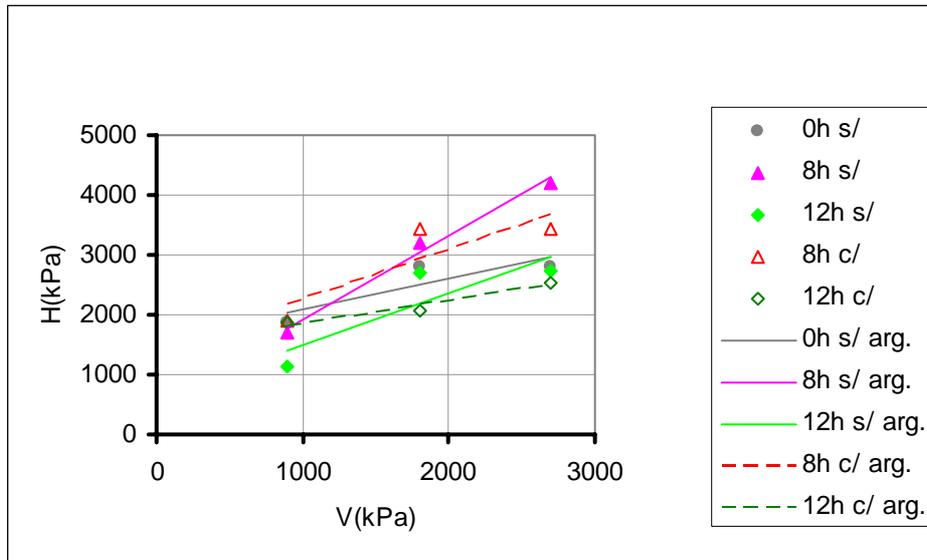
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.9 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Apicoamento; e Temperatura da Superfície: 25°C



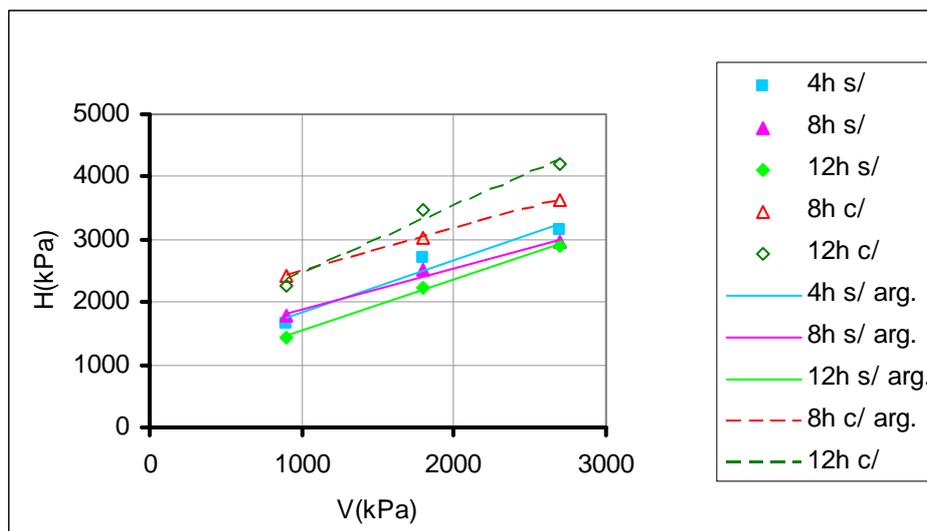
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.10 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Apicoamento; e Temperatura da Superfície: 45°C



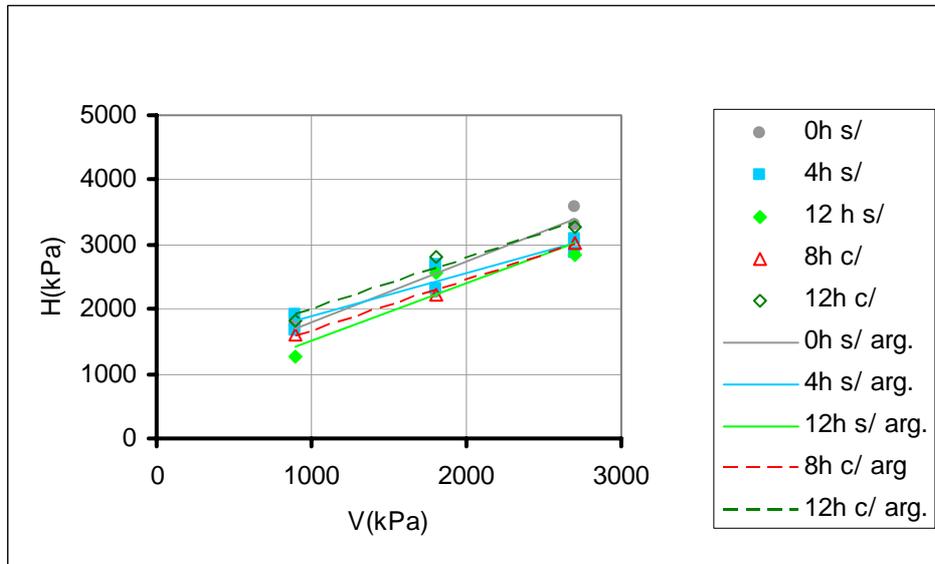
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.11 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Limpeza com Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 25°C



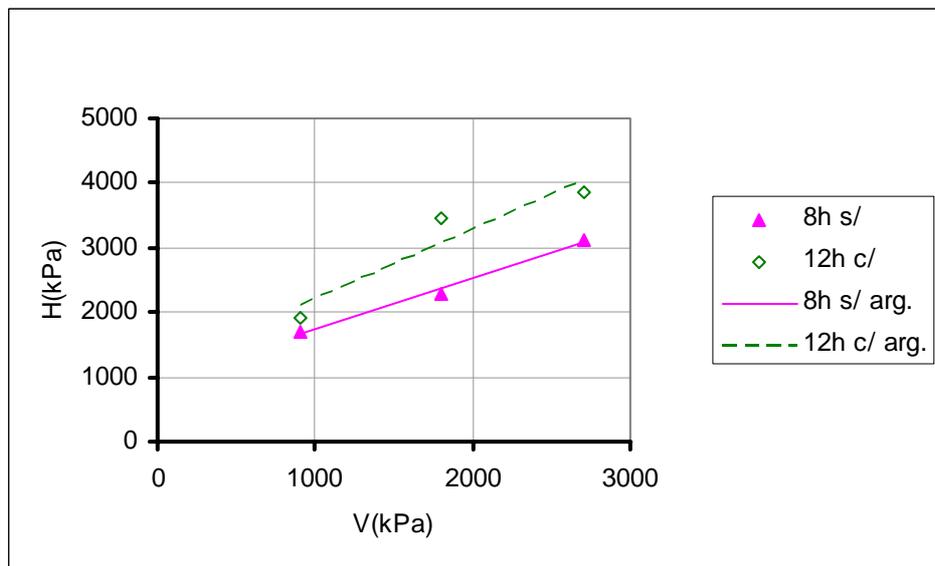
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.12 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Limpeza com Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 45°C



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.13 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Apicoamento; e Temperatura da Superfície: 25°C



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.14 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo e Uso de Argamassa Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Apicoamento; e Temperatura da Superfície: 45°C

Observando os dados apresentados graficamente para a segregação de dados apresentada anteriormente, nas Figuras 6.7 a 6.14, os seguintes comentários podem ser feitos:

- Os resultados obtidos para as condições que consideram intervalos de tempo sem argamassa são inferiores aos demais, mostrando que os parâmetros das envoltórias de resistência têm degradação significativa para alguns intervalos de tempo, exigindo a colocação de argamassa.
- A utilização de argamassa fornece parâmetros consideravelmente superiores aos demais casos, homogeneizando os resultados, havendo uma tendência de obtenção de mesmos resultados independentemente do intervalo de tempo decorrido entre as concretagens sucessivas.
- O tratamento da superfície através de seu apicoamento, mostra resultados menos dispersos, contidos em faixa mais estreitas do gráfico.
- Surge uma tendência de convergência de resultados para intervalos de lançamento entre 0 e 8 horas, sem utilização de argamassa de ligação, para o concreto ensaiado.

Completando a segregação de dados previamente apresentadas, para intervalos de tempo de lançamento entre camadas superiores à 12h, as configurações simuladas consideram a presença de argamassa de ligação. Para facilitar a interpretação, são apresentadas as envoltórias de resistência por situações com mesma idade do concreto, mesmo tratamento de junta e mesma temperatura ambiente, variando o intervalo entre lançamentos, conforme mostrado nas Figuras 6.15 a 6.22. As envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb, representadas por seus valores de coesão e ângulo de atrito obtidos através de regressões lineares estão listadas na Tabela 6.13.

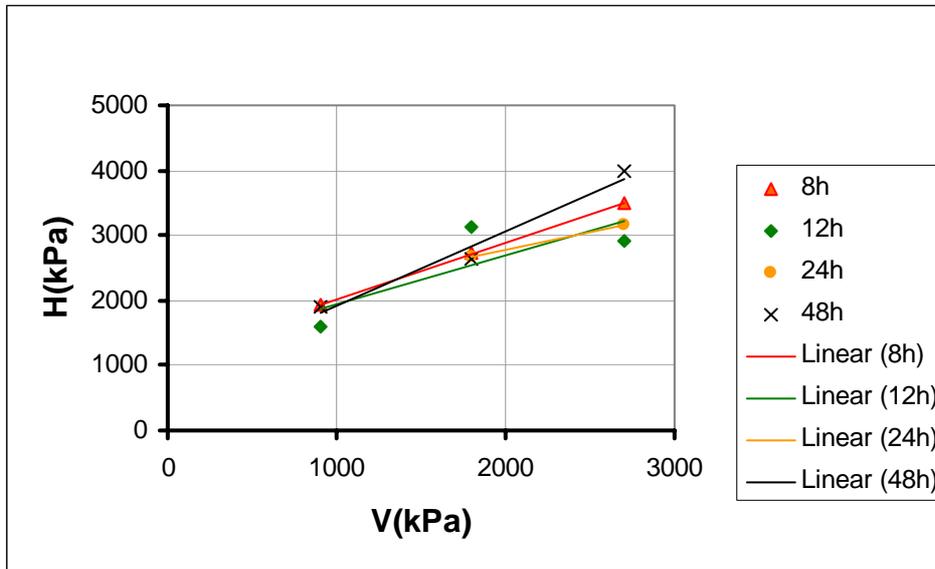
De forma semelhante à segregação de dados imediatamente anterior, observando os diversos gráficos com as envoltórias de resistência entre camadas, pode-se inferir:

- Não existe influência perceptível do intervalo de tempo nos resultados, com a variabilidade geral do processo interferindo mais que este parâmetro;

- Os resultados obtidos nas juntas com apicoamento da superfície são menos dispersos, contidos em faixas mais estreitas dos gráficos
- Não são verificáveis influências significativas devidas à variação de temperatura no Climatizador, ou à diferença entre as duas idades de controle de 120 e 180 dias.

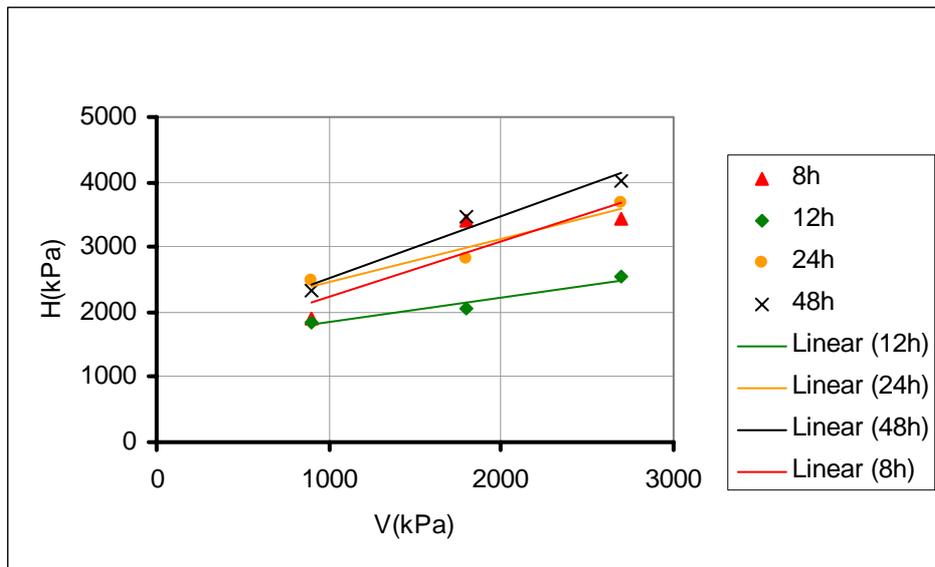
TABELA 6.13 Parâmetros das Envoltórias de Resistência para a Análise da Envoltória de Resistência entre Camadas com Intervalos de Tempo Superiores a 8h com Utilização de Argamassa de Ligação

| IDADE (dias) | TRAT. SUPERF. | TRAT. | 25°C | | | 45°C | | |
|-----------------|------------------|--------|-----------------|-----------------------------|---------|-----------------|-----------------------------|--------|
| | | | COESÃO (kPa) | ÂNGULO ATRITO (graus) | R2 | COESÃO (kPa) | ÂNGULO ATRITO (graus) | R2 |
| 120 | Ar Compr | 8h c/ | 1.140 | 41,2 | 0,9999 | 2029 | 29,2 | 0,9694 |
| | | 12h c/ | 1.226 | 36,3 | 0,6222 | 2.042 | 32,8 | 0,9948 |
| | | 24h c/ | 1.682 | 28,8 | 1 | 1.195 | 37,7 | 1 |
| | | 48h c/ | 765 | 49,0 | 0,9713 | 1.592 | 23,0 | 1 |
| | Apicoam. | 8h c/ | 1.182 | 36,6 | 0,9946 | 1.514 | 41,4 | 1 |
| | | 12h c/ | 902 | 47,8 | 0,99963 | 715 | 52,4 | 0,9911 |
| | | 24h c/ | 1.559 | 35,6 | 0,9346 | 1.066 | 43,6 | 0,9997 |
| | | 48h c/ | 1.334 | 35,9 | 0,978 | 1.155 | 46,9 | 0,9858 |
| 180 | Ar Compr | 8h c/ | 1.402 | 40,1 | 0,7535 | 1834 | 33,9 | 1 |
| | | 12h c/ | 1.468 | 20,9 | 0,953 | 1.393 | 46,9 | 0,9771 |
| | | 24h c/ | 1.799 | 33,6 | 0,943 | 697 | 51,3 | 0,9635 |
| | | 48h c/ | 1.567 | 43,5 | 0,9587 | -87 | 57,5 | 0,9849 |
| | Apicoam. | 8h c/ | 858 | 38,4 | 0,9944 | xx | xx | xx |
| | | 12h c/ | 1.194 | 38,6 | 0,9609 | 1103 | 47,6 | 0,9012 |
| | | 24h c/ | 1.443 | 42,0 | 0,9341 | 1086 | 44,4 | 0,9975 |
| | | 48h c/ | 1.352 | 34,2 | 0,9871 | 1660 | 32,3 | 0,9518 |



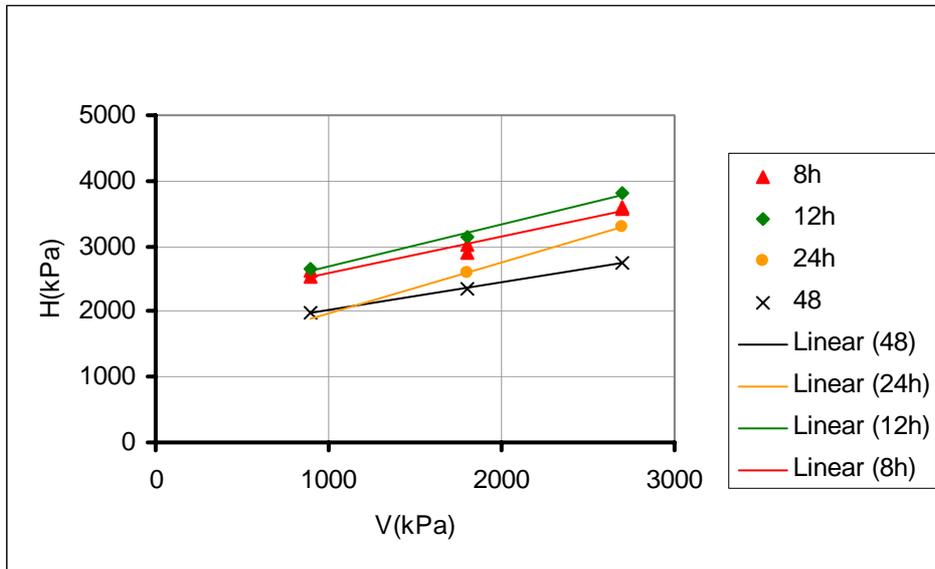
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.15 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa. Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 25°C



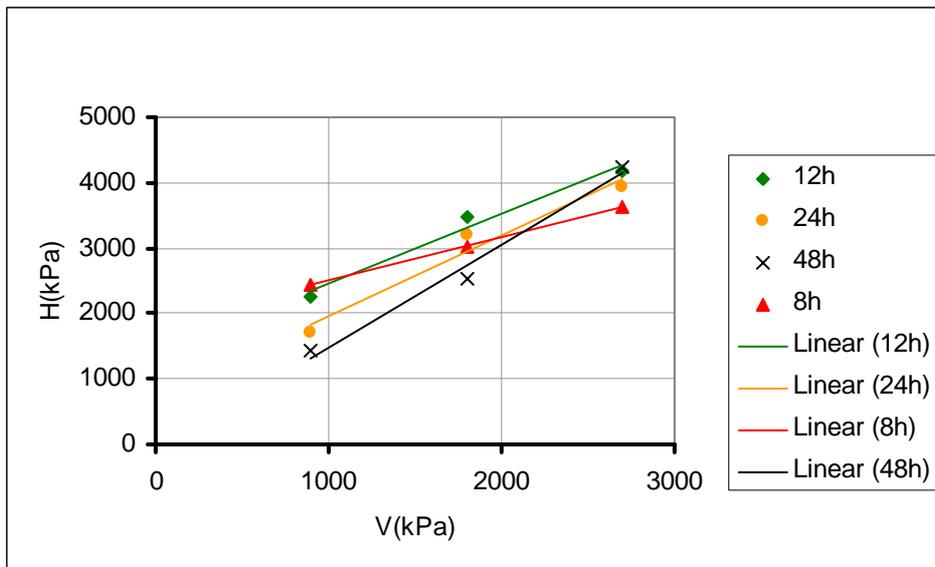
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.16 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa. Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 25°C



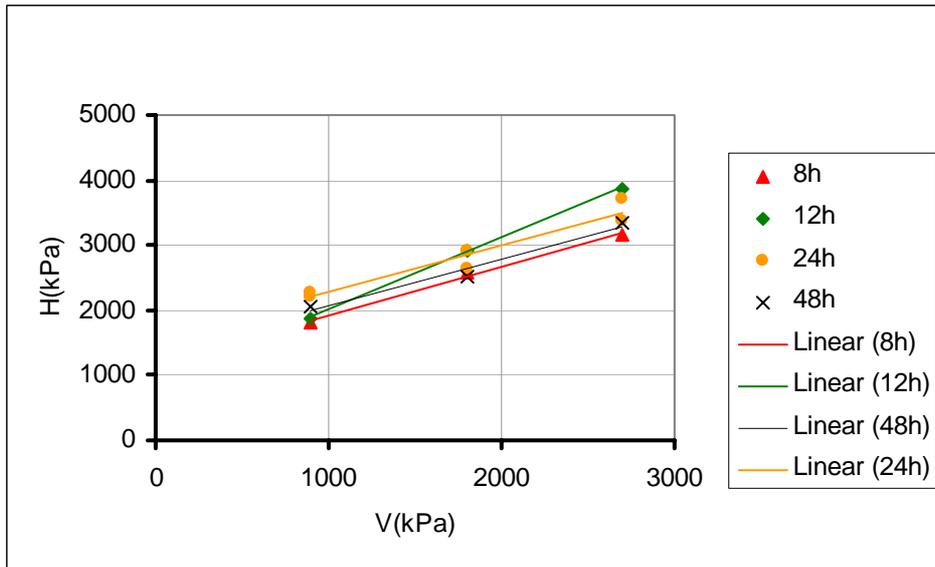
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.17 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa. Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 45°C



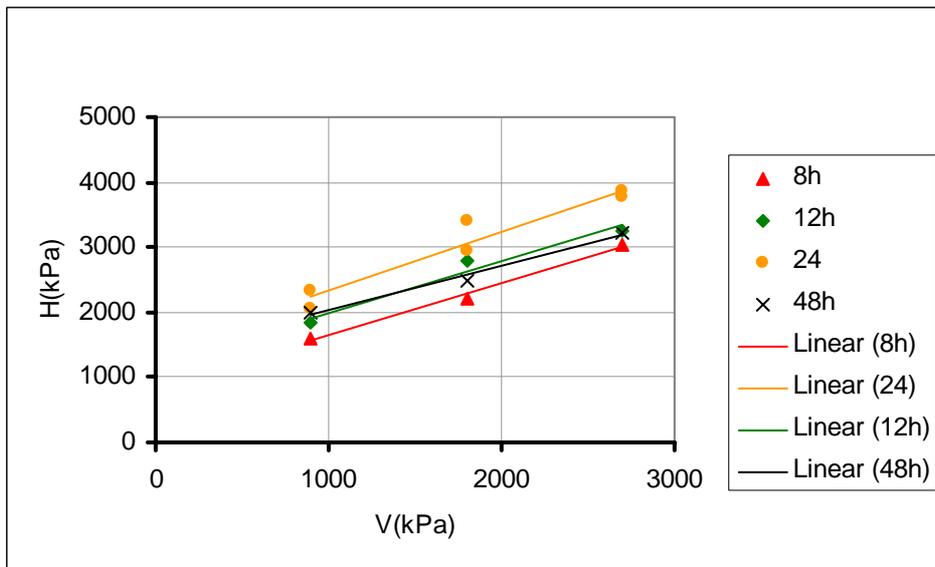
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.18 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa. Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; e Temperatura da Superfície: 45°C



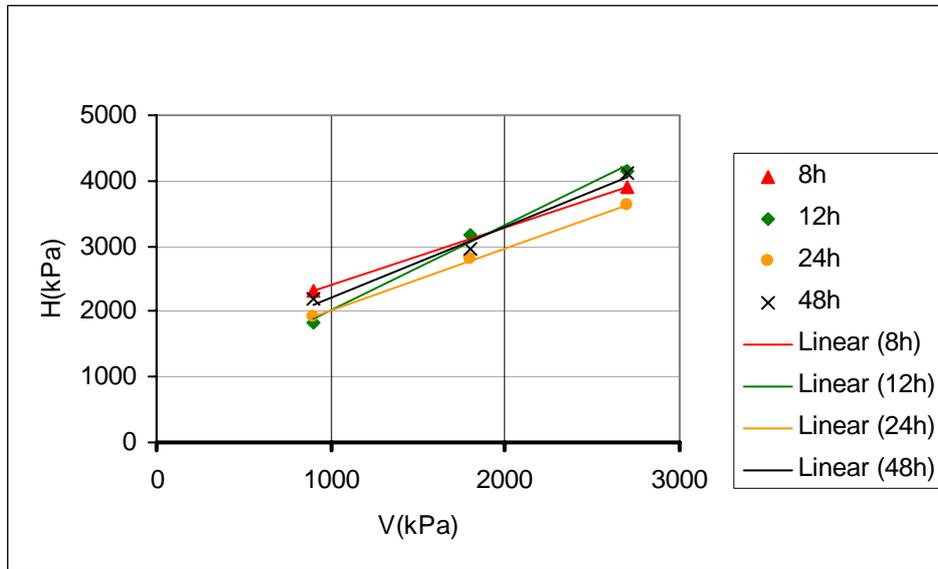
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.19 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa. Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Apicoado; e Temperatura da Superfície: 25°C



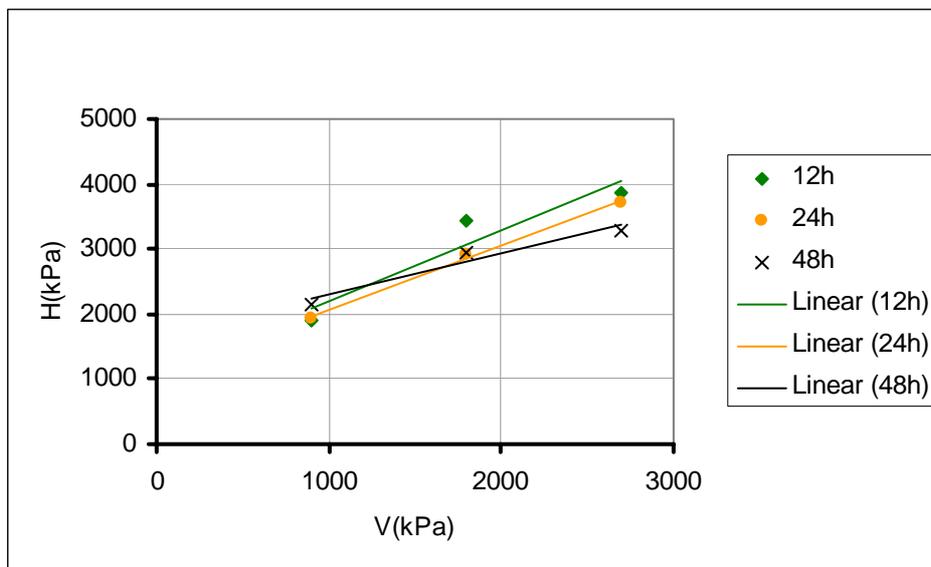
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.20 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa. Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Apicoado; e Temperatura da Superfície: 25°C



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.21 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Apicoado; e Temperatura da Superfície: 45°C



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.22 Envoltórias Variando Intervalo de Tempo Utilizando Argamassa Idade: 180 dias; Tratamento de Camada: Apicoado; e Temperatura da Superfície: 45°C

6.3 AVALIAÇÃO DA POSIÇÃO RELATIVA NO MACIÇO – PROGRAMA EXPERIMENTAL COMPLEMENTAR I

Com o intuito de verificar a influência do posicionamento relativo das camadas ao longo da altura nos resultados do ensaio, foram realizados ensaios com metade dos testemunhos obtidos posicionando a sonda sobre a camada IV (a partir de agora denominado de sentido 1), e a outra metade girando o maciço experimental em 180° com relação ao seu eixo longitudinal e apoiando a sonda rotativa sobre a camada I (a partir de agora denominado sentido 2). As Tabelas 6.14 e 6.15 mostram a caracterização física dos testemunhos, apresentados na Figura 6.23.

TABELA 6.14 Projeto Experimental Complementar I – Resistência à Compressão, Massa Específica e de Módulo de Elasticidade dos Corpos-de-prova Obtidos de Testemunhos

| | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) | | MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³) | | MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa) | |
|-----------|-----------------------------------|------|--|--------|---------------------------------|------|
| SENTIDO 1 | | | | | | |
| II | Média | 8,2 | Média | 2550,8 | Média | 13,7 |
| | Desvio Padrão | 0,31 | Desvio Padrão | 11,00 | Desvio Padrão | 1,72 |
| | Coef. Variação | 4% | Coef. Variação | 0% | Coef. Variação | 13% |
| III | Média | 8,8 | Média | 2544,5 | Média | 15,4 |
| | Desvio Padrão | 0,32 | Desvio Padrão | 15,60 | Desvio Padrão | 3,06 |
| | Coef. Variação | 4% | Coef. Variação | 1% | Coef. Variação | 20% |
| IV | Média | 9,2 | Média | 2550,5 | Média | 17,9 |
| | Desvio Padrão | 0,45 | Desvio Padrão | 18,34 | Desvio Padrão | 1,33 |
| | Coef. Variação | 5% | Coef. Variação | 1% | Coef. Variação | 7% |
| SENTIDO 2 | | | | | | |
| II | Média | 8,5 | Média | 2550,3 | Média | 14,6 |
| | Desvio Padrão | 0,63 | Desvio Padrão | 7,26 | Desvio Padrão | 1,73 |
| | Coef. Variação | 7% | Coef. Variação | 0% | Coef. Variação | 12% |
| III | Média | 8,8 | Média | 2546,4 | Média | 13,6 |
| | Desvio Padrão | 0,29 | Desvio Padrão | 8,62 | Desvio Padrão | 4,07 |
| | Coef. Variação | 3% | Coef. Variação | 0% | Coef. Variação | 30% |
| IV | Média | 8,9 | Média | 2542,0 | Média | 16,4 |
| | Desvio Padrão | 0,31 | Desvio Padrão | 11,35 | Desvio Padrão | 1,83 |
| | Coef. Variação | 3% | Coef. Variação | 0% | Coef. Variação | 11% |

Nota: Valores aos 180 dias

TABELA 6.15 Projeto Experimental Complementar I – Resistência à Tração das Juntas dos Corpos-de-prova obtidos de Testemunhos

| RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA – 180 dias (MPa) | | | | | |
|--|----------------|------|-----------|----------------|------|
| SENTIDO 1 | | | SENTIDO 2 | | |
| I/II | Média | 0,5 | I/II | Média | 0,5 |
| | Desvio Padrão | 0,09 | | Desvio Padrão | 0,06 |
| | Coef. Variação | 17% | | Coef. Variação | 13% |
| II/III | Média | 0,4 | II/III | Média | 0,5 |
| | Desvio Padrão | 0,15 | | Desvio Padrão | 0,07 |
| | Coef. Variação | 39% | | Coef. Variação | 13% |
| III/IV | Média | 0,6 | III/IV | Média | 0,5 |
| | Desvio Padrão | 0,04 | | Desvio Padrão | 0,12 |
| | Coef. Variação | 7% | | Coef. Variação | 23% |

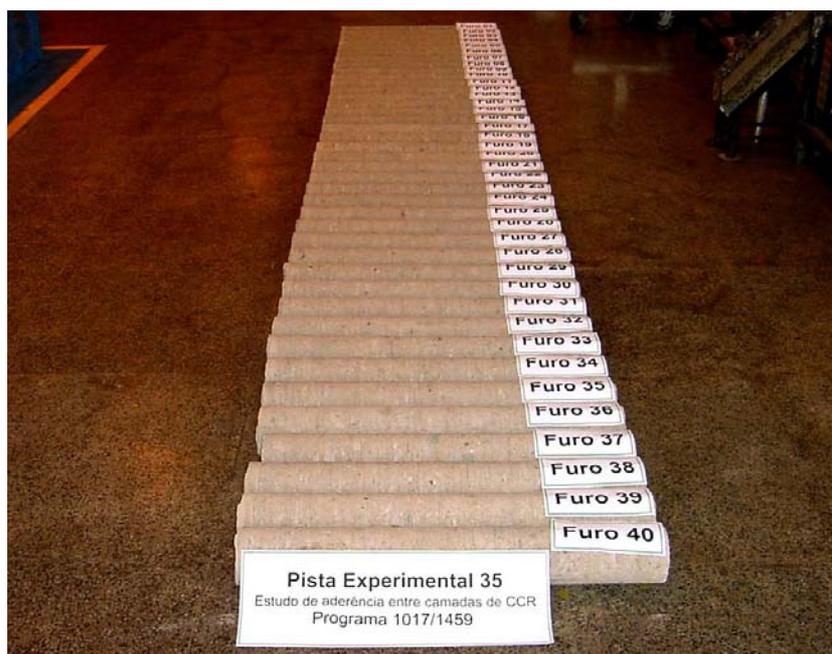


FIGURA 6.23 Testemunhos do Programa Experimental Complementar I

Os resultados de resistência à tração direta na junta apresentam notável homogeneidade, indicando procedimentos adequados e uniformes de preparação e climatização das juntas. Os ensaios de cisalhamento direto estão resumidos na Figura 6.24, para facilitar a interpretação dos dados, e o resumo das regressões lineares está disposta na Tabela 6.16.

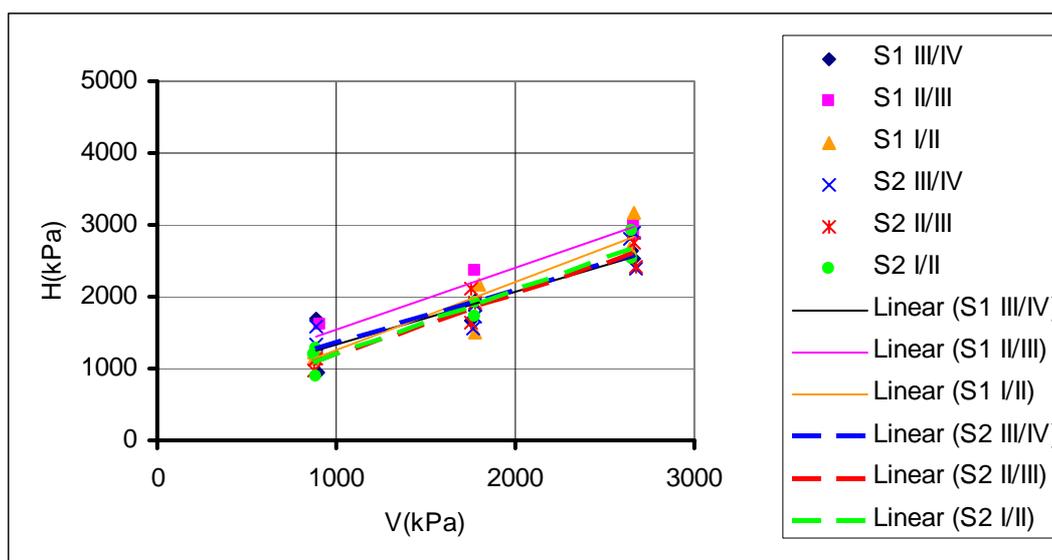


FIGURA 6.24 Resultados Envolvórias de Resistência – Programa Complementar I

Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada
S1: Sentido 1
S2 Sentido 2
I/II Junta entre camadas I e II
II/III Junta entre camadas II e III
III/IV Junta entre camadas III e IV

TABELA 6.16 Parâmetros das Envolvórias de Resistência para o Programa Experimental Complementar I com Intervalo de Tempo Igual à 4h, sem Utilização de Argamassa de Ligação

| JUNTA | COESÃO (MPa) | ÂNGULO DE ATRITO (graus) | R ² |
|-----------|--------------|--------------------------|----------------|
| SENTIDO 1 | | | |
| I/II | 493 | 43,4 | 0,8976 |
| II/III | 668 | 40,8 | 0,9473 |
| III/IV | 598 | 36,2 | 0,8489 |
| SENTIDO 2 | | | |
| I/II | 314 | 41,6 | 0,9406 |
| II/III | 334 | 40,5 | 0,9226 |
| III/IV | 648 | 36,0 | 0,8183 |

Os resultados do Programa Experimental Complementar I mostram uma uniformidade razoável de resultados nos ensaios de cisalhamento direto, em relação ao programa anteriormente apresentado. Os resultados são procedentes de um único maciço experimental, que é feito num

intervalo de tempo relativamente curto, permitindo uma diminuição das variabilidades inerentes a processos muito longos, caso dos ensaios nos 10 maciços experimentais para análise da envoltória entre camadas, cuja execução foi da ordem de 24 meses. A uniformidade de procedimentos gerada pela concentração de ensaios no tempo deve ter se estendido à retirada dos testemunhos e usinagem dos corpos-de-prova, provavelmente diminuindo os ruídos do processo.

Avaliando separadamente os resultados apresentados nas Tabelas 6.14 e 6.15, verifica-se que para todos os parâmetros analisados não há diferenças significativas dos resultados, com coeficientes de variação adequados para o tipo de análise. Conclui-se, portanto, que o sentido de extração não apresenta interferência estatisticamente comprovada nos resultados.

Como vantagem adicional, este estudo complementar fornece uma quantidade expressiva de resultados para a situação de intervalo de tempo entre camadas igual à 4 horas e sem utilização de argamassa. O resumo estatístico para a totalidade dos dados estudados, excetuando-se as envoltórias de resistências, está apresentado na Tabela 6.17.

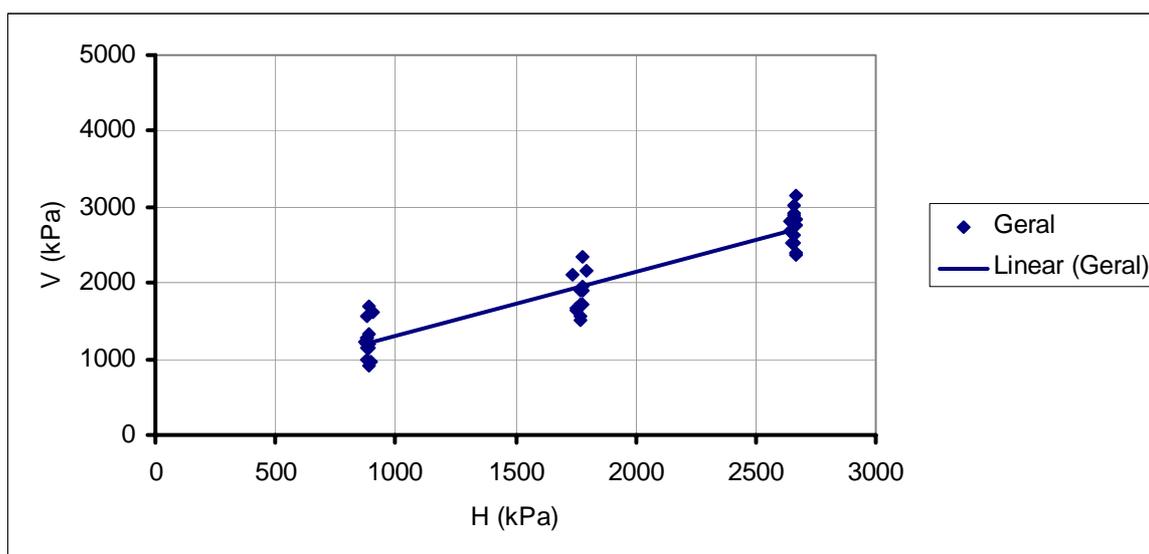
No caso dos ensaios de resistência ao cisalhamento, foram efetuados três estudos comparativos. No primeiro, foi executada regressão linear para a totalidade dos pontos, conforme apresentado na Figura 6.25, determinando-se sua coesão e ângulo de atrito. No segundo estudo, foram determinadas as envoltórias de resistência de cada uma das 6 superfícies estudadas, fazendo estatísticas separadas da coesão e do coeficiente de atrito. O último seguiu o procedimento do estudo anterior, considerando alternativamente o valor do ângulo de atrito ao invés do coeficiente de atrito. Um resumo destas análises está representado na Tabela 6.18.

TABELA 6.17 Resultado Geral de Resistência à Compressão, Massa Específica, Resistência à Tração Direta e Módulo de Elasticidade para Testemunhos do Programa Experimental Complementar I

| PARÂMETRO (180 dias) | MÉDIA | DESVIO PADRÃO | COEFICIENTE DE VARIAÇÃO |
|---------------------------------------|-------|---------------|-------------------------|
| Resistência à Compressão (MPa) | 8,70 | 0,50 | 6% |
| Massa Específica (kg/m ³) | 2548 | 18 | 1% |
| Módulo de Elasticidade (GPa) | 15,3 | 1,33 | 9% |
| Resistência à Tração Direta (MPa) | 0,50 | 0,10 | 21% |

TABELA 6.18 Análise Estatística da Envoltória de Resistência da Junta – Programa Experimental Complementar I

| ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA | | |
|--|--------------|--------------------------|
| ENVOLTÓRIA GLOBAL | | |
| | Coesão (kPa) | Ângulo de Atrito (graus) |
| | 493 | 39 |
| Coeficiente de Correlação R ² | 0,8692 | |
| ENVOLTÓRIAS INDIVIDUAIS 1 | | |
| | Coesão (kPa) | Coeficiente de Atrito |
| Média | 481 | 0,835 (39,9°) |
| Desvio Padrão | 173 | 0,0878 (5°) |
| Coeficiente de Variação | 36% | 11% |
| ENVOLTÓRIAS INDIVIDUAIS 2 | | |
| | Coesão (kPa) | Ângulo de Atrito (graus) |
| Média | 481 | 39,8 |
| Desvio Padrão | 173 | 3 |
| Coeficiente de Variação | 36% | 8% |



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
 H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.25 Envoltória Geral de Resistência – Programa Experimental Complementar I

O Estudo Complementar I, pela quantidade de ensaios relativamente grande para uma combinação única de fatores controláveis com quinze ternos de valores para analisar, permite algumas análises complementares sobre os ensaios de cisalhamento direto. A Tabela 6.19 apresenta a média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto segregados por tensão normal de compressão.

TABELA 6.19 Análise Estatística Segregando Resultados por Tensão Normal de Ensaio

| TENSÃO NORMAL (kPa) | TENSÃO DE CISALHAMENTO (kPa) | | |
|---------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------|
| | MÉDIA (kPa) | DESVIO PADRÃO (kPa) | COEFICIENTE DE VARIAÇÃO |
| 900 | 1246 | 235 | 19% |
| 1800 | 1925 | 365 | 19% |
| 2700 | 2682 | 293 | 11% |

Com o manuseio dos dados apresentados, algumas reflexões e conclusões podem ser feitas:

- Primeiramente, verifica-se a grande semelhança de valores obtidos para a envoltória de resistência considerando os três tipos de tratamento estatísticos apresentados na Tabela 6.18. Os resultados são homogêneos e a envoltória de resistência, para este tratamento pode ser expressada pela equação 6.1.

$$\tau = 0,49 + \sigma.tg39,5^\circ \text{ (em MPa)} \quad (6.1)$$

- Durante a análise estatística através da média e desvio padrão dos valores separados de coesão e atrito, verificou-se que a dispersão dos valores de coesão é superior àquela apresentada pelo ângulo de atrito ou coeficiente de atrito. Os resultados da análise apresentada na Tabela 6.19 mostram a dispersão dos dados existente em cada

nível de tensão utilizado no ensaio de cisalhamento direto. Os coeficientes de variação para cada tensão normal são compatíveis com resultados usuais de ensaios mecânicos do concreto, mostrando a confiabilidade dos resultados. Quando do cálculo das regressões lineares individuais, pequenas variações em qualquer ponto podem alterar significativamente os resultados de coesão e ângulo de atrito.

A maior variabilidade dos valores de coesão aparente é esperada, pois a adesão entre camadas é mais influenciada pelo processo de extração de testemunhos, bem como pelas falhas nos processos de preparação das camadas.

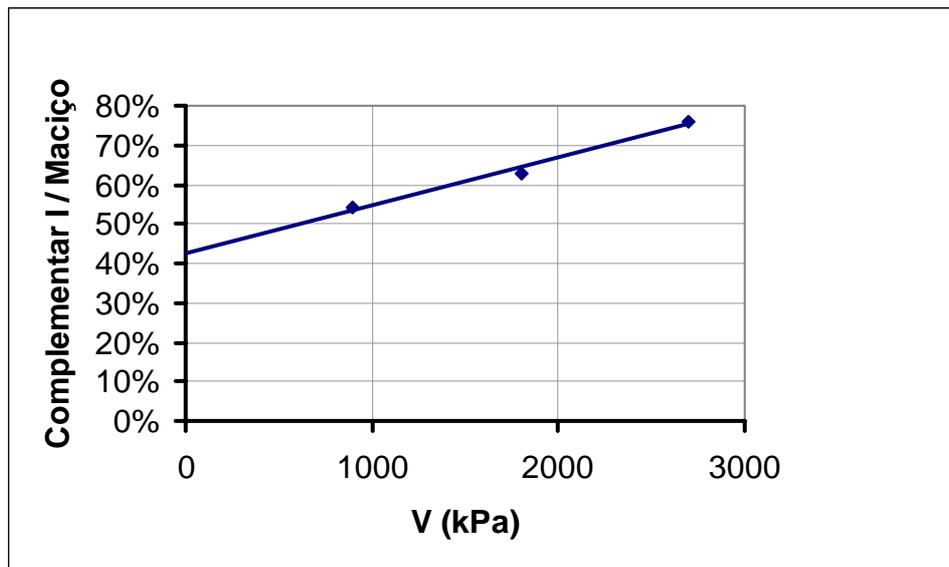
- Para avaliação do efeito da junta em relação ao material do maciço sem descontinuidades construtivas, pode-se utilizar o artifício de comparar os resultados para cada tensão normal considerada nos ensaios. A Tabela 6.20 mostra os resultados obtidos neste programa complementar, os obtidos no estudo do maciço fora das juntas, e sua relação.

TABELA 6.20 Análise Estatística Segregando Resultados por Tensão Normal de Ensaio

| TENSÃO NORMAL (kPa) | TENSÃO DE CISALHAMENTO (kPa) | | |
|---|------------------------------|---------------------|-------------------------|
| | MÉDIA (kPa) | DESVIO PADRÃO (kPa) | COEFICIENTE DE VARIAÇÃO |
| Programa Experimental Complementar I | | | |
| 900 | 1246 | 235 | 19% |
| 1800 | 1925 | 365 | 19% |
| 2700 | 2682 | 293 | 11% |
| Resultados de Testemunhos do Maciço | | | |
| 900 | 2296 | 284 | 12% |
| 1800 | 3059 | 384 | 13% |
| 2700 | 3525 | 233 | 7% |
| Relação entre Programa Experimental Complementar I e o Concreto do Maciço | | | |
| 900 | 54% | | |
| 1800 | 63% | | |
| 2700 | 76% | | |

Verifica-se que a diminuição de resistência é menos intensa com o aumento da tensão normal do ensaio, comportamento explicado pela menor influência relativa da coesão com o aumento da tensão normal aplicada durante o ensaio.

Tomando a hipótese simplificadora de ser o comportamento da perda de resistência linear, baseada na validade da envoltória de Mohr-Coulomb onde coesão e ângulo de atrito são constantes, pode-se obter o gráfico apresentado na Figura 6.26, onde a regressão linear apresenta um coeficiente de regressão R^2 igual a 0,9861. Observa-se que a perda de resistência ao cisalhamento com este tratamento de junta é superior a 50%. Nesta perda, obviamente, estão considerados os efeitos do traumatismo gerado pelo processo de extração dos testemunhos e sua usinagem para a obtenção dos corpos-de-prova dos ensaios de cisalhamento direto.



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.26 Perda de Resistência de Testemunhos Cilíndricos à Compressão para a Situação de Junta do Estudo Experimental Complementar I em Relação ao Maciço entre Camadas

6.4 RESULTADOS CORPOS-DE-PROVA PRISMÁTICOS – PROGRAMA EXPERIMENTAL COMPLEMENTAR II

Em todas as análises estatísticas apresentadas, os resultados nos testemunhos mostram resultados inferiores aos gerados por corpos-de-prova moldados, mostrando claramente os efeitos do traumatismo causado pelo processo de extração. A avaliação deste efeito nos ensaios de cisalhamento é complexa e não há estudos extensos na bibliografia disponível, dificultando a segregação da dispersão de resultados ocasionada pela obtenção daqueles intrinsecamente relacionados ao material e aos procedimentos de ensaio. Para efeitos comparativos foram extraídos corpos-de-prova prismáticos com serra de fio diamantado dos maciços 11,12,13, 15, 16 e 17, executados com apenas duas camadas, com as simulações abaixo discriminadas na Tabela 6.21. A escolha dos tratamentos experimentais foi baseada na procura dos efeitos do intervalo de tempo entre camadas nas primeiras idades sem utilização de argamassa, e a comparação com os resultados de camadas tratadas com argamassa com intervalos de tempo de concretagem de 24 horas. Os dois primeiros resultados permitem avaliar o efeito da degradação das condições de ligação de junta com o tempo, sendo especialmente úteis para balizamento do tempo em que poderia ser dispensada a argamassa no processo de construção rampado. No segundo caso, como os resultados mostraram que o efeito da argamassa uniformiza os resultados dos parâmetros de cisalhamento independentemente do intervalo de lançamento, escolheu-se estudar o valor de 24 horas que é comum nas execuções de CCR convencional no Brasil.

TABELA 6.21 Matriz Experimental – Testemunhos Prismáticos

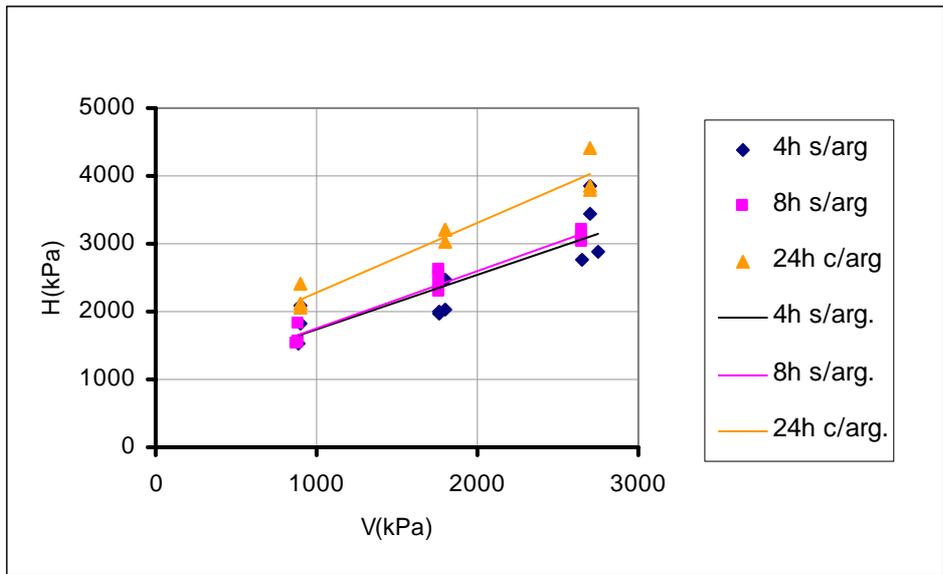
| MACIÇO | INTERVALO DE LANÇAMENTO (h) | TEMPERATURA (°C) | TRATAMENTO | ARGAMASSA DE LIGAÇÃO |
|--------|-----------------------------|------------------|---------------|----------------------|
| 11 | 24 | 25 | Apicoado | Com |
| 12 | 24 | 25 | Apicoado | Com |
| 13 | 4 | 25 | Ar Comprimido | Sem |
| 15 | 4 | 25 | Ar Comprimido | Sem |
| 16 | 8 | 25 | Apicoado | Com |
| 17 | 8 | 25 | Apicoado | Com |

Além dos corpos-de-prova prismáticos, para os mesmos maciços e condições foram também obtidos corpos-de-prova cilíndricos moldados e corpos-de-prova obtidos de testemunhos, conforme apresentado na Figura 6.27. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para estes três conjuntos de corpos-de-prova estão discriminados nas Figuras 6.28 a 6.30.



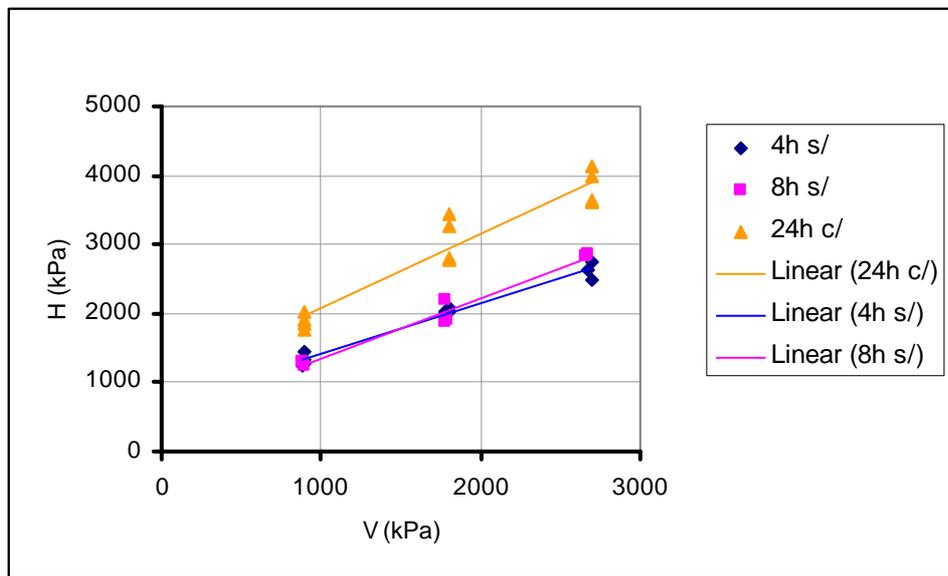
FIGURA 6.27 Corpos-de-Prova obtidos de Testemunhos Prismáticos Juntamente com os seus Correspondentes Cilíndricos

A Tabela 6.22 mostra os resultados das regressões lineares obtidas para os três conjuntos de ensaios das Figuras 6.28 a 6.30. Procurando comparar os resultados dos três tipos de corpo-de-prova, na Tabela 6.23 estão apresentados os resultados dos ensaios segregados por mesma tensão normal.



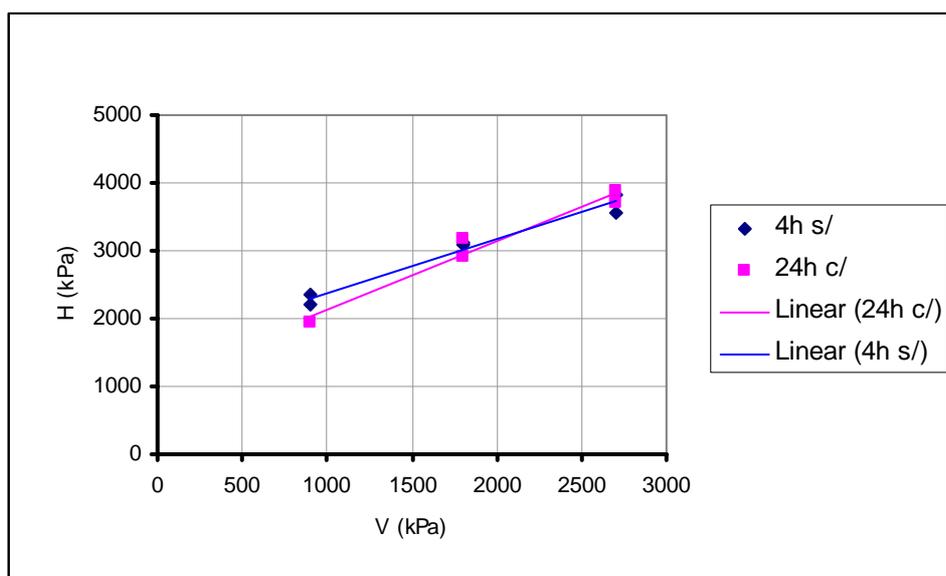
Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.28 Envoltórias de Resistência dos Corpos-de-Prova Gerados por Testemunhos Prismáticos



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.29 Envoltórias de Resistência dos Corpos-de-Prova Gerados por Testemunhos Cilíndricos



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.30 Envoltórias de Resistência dos Corpos-de-Prova Gerados por Corpos-de-Prova Moldados

TABELA 6.22 Parâmetros das Envoltórias de Resistência para o Programa Experimental Complementar II

| INTERVALO DE LANÇAMENTO – ARGAMASSA DE LIGAÇÃO | COESÃO (kPa) | ÂNGULO ATRITO (graus) | R ² |
|--|--------------|-----------------------|----------------|
| Testemunhos Prismáticos | | | |
| 4h – sem argamassa | 913 | 39,2 | 0,7235 |
| 8h – sem argamassa | 903 | 40,2 | 0,9683 |
| 24h – com argamassa | 1260 | 45,8 | 0,9460 |
| Testemunhos Cilíndricos | | | |
| 4h – sem argamassa | 702 | 35,8 | 0,9761 |
| 8h – sem argamassa | 451 | 41,2 | 0,9716 |
| 24h – com argamassa | 975 | 47,4 | 0,9177 |
| Corpos-de-Prova Moldados | | | |
| 4h – sem argamassa | 1589 | 38,5 | 0,9714 |
| 24h – com argamassa | 1114 | 45,4 | 0,9654 |

TABELA 6.23 Segregação dos Resultados do Programa Experimental Complementar II por Tensão Normal

| INTERV. DE LANÇAMENTO ARGAMASSA DE LIGAÇÃO | PARÂMETRO | TENSÃO NORMAL (kPa) | | |
|---|---------------------|---------------------|------|------|
| | | 900 | 1800 | 2700 |
| Testemunhos Prismáticos | | | | |
| 4h – sem argamassa | Média (kPa) | 1814 | 2118 | 3237 |
| | Desvio Padrão (kPa) | 269 | 230 | 504 |
| | Coef. Variação | 15% | 11% | 16% |
| 8h – sem argamassa | Média (kPa) | 1617 | 2455 | 3108 |
| | Desvio Padrão (kPa) | 131 | 136 | 73 |
| | Coef. Variação | 8% | 6% | 2% |
| 24h – com argamassa | Média (kPa) | 2173 | 3147 | 4022 |
| | Desvio Padrão (kPa) | 155 | 93 | 349 |
| | Coef. Variação | 7% | 3% | 9% |
| Testemunhos Cilíndricos | | | | |
| 4h – sem argamassa | Média (kPa) | 1324 | 2041 | 2615 |
| | Desvio Padrão (kPa) | 83 | 31 | 136 |
| | Coef. Variação | 6% | 2% | 5% |
| 8h – sem argamassa | Média (kPa) | 1237 | 1992 | 2841 |
| | Desvio Padrão (kPa) | 60 | 179 | 12 |
| | Coef. Variação | 5% | 9% | 0% |
| 24h – com argamassa | Média (kPa) | 1882 | 3070 | 3837 |
| | Desvio Padrão (kPa) | 105 | 333 | 259 |
| | Coef. Variação | 6% | 11% | 7% |
| Corpos-de-Prova Moldados | | | | |
| 4h – sem argamassa | Média (kPa) | 2267 | 3097 | 3699 |
| | Desvio Padrão (kPa) | 102 | 20 | 179 |
| | Coef. Variação | 5% | 1% | 5% |
| 24h – com argamassa | Média (kPa) | 1929 | 3036 | 3802 |
| | Desvio Padrão (kPa) | -- | 184 | 129 |
| | Coef. Variação | -- | 6% | 3% |

Para efeito de comparação das formas de obtenção dos corpos-de-prova, a Tabela 6.24 mostra a relação entre os resultados segregados por tensão normal para os ensaios dos testemunhos cilíndricos e os de testemunhos prismáticos.

TABELA 6.24 Relação dos Resultados Segregados por Tensão Normal entre os Resultados dos Testemunhos Cilíndricos em Função dos Prismáticos

| INTERVALO DE LANÇAMENTO – ARGAMASSA DE LIGAÇÃO | TENSÃO NORMAL (kPa) | | |
|---|---------------------|------|------|
| | 900 | 1800 | 2700 |
| 4h – sem argamassa | 73% | 96% | 81% |
| 8h – sem argamassa | 76% | 81% | 91% |
| 24h – com argamassa | 87% | 98% | 95% |

A Tabela 6.25 mostra a relação dos resultados de tratamentos de junta com intervalo de tempo de 4 horas sem colocação de argamassa com àqueles com intervalo de 24 horas com aplicação de argamassa de ligação.

TABELA 6.25 Relação dos Resultados Segregados por Tensão Normal entre os Resultados de Intervalo de Tempo de 4 Horas sem Argamassa em Relação aos de 24 Horas com Argamassa

| TIPO DE CORPO-DE-PROVA | TENSÃO NORMAL (kPa) | | |
|--------------------------|---------------------|------|------|
| | 900 | 1800 | 2700 |
| Testemunhos Prismáticos | 83% | 67% | 80% |
| Testemunhos Cilíndricos | 70% | 66% | 68% |
| Corpos-de-Prova Moldados | 118% | 102% | 97% |

Os resultados do Estudo Experimental Complementar II, após as análises previamente apresentadas permitem algumas considerações e conclusões:

- Os resultados dos ensaios de cisalhamento com intervalo de lançamento entre camadas de 4 horas e 8 horas sem utilização de argamassa de ligação apresentaram envoltórias de resistência que não podem ser diferenciadas estatisticamente. As especificações de projeto indicam atualmente intervalos máximos de tempo entre 3 e 4 horas para dispensa da utilização de argamassa de ligação entre camadas. Os resultados indicam que estes valores podem ser conservadores, e sua flexibilização permitiria economias de material e tempo significativas no processo de lançamento rampado. Pela grande responsabilidade envolvida são necessárias pesquisas complementares para vários tipos de constituintes do CCR para obtenção de valores indicativos gerais, ou alternativamente estudar este intervalo de tempo adequado em maciços experimentais em laboratório durante as investigações iniciais em cada obra específica.
- Para as mesmas condições de execução de ensaios, os resultados obtidos nos testemunhos prismáticos são sistematicamente superiores àqueles gerados pelos testemunhos cilíndricos, comprovando a importância dos tamanhos e processo de obtenção dos corpos-de-prova, tendência já observada em resultados em rochas (BARTON e BANDIS, 1980; FRANKLIN e DUSSEAULT, 1989) e em ensaios de juntas de CCR nos estudos de MARQUES FILHO et al., em 1998 e 1999. Em situações sem utilização de argamassa de ligação, dependendo do nível de tensões normais esta perda é da ordem de 20%. Os resultados das juntas com argamassa com intervalo de tempo de 24h, este efeito mostrou-se atenuado, obtendo-se perdas de resistência significativamente menores. Como os resultados do programa experimental para análise entre camadas mostram uma uniformização de parâmetros de cisalhamento quando da utilização de argamassa quaisquer que sejam os intervalos de tempo, existe uma tendência de que esta atenuação dos efeitos da extração se estenda a todos os intervalos considerados.

- A aplicação de argamassa de ligação é bastante efetiva para o intervalo de tempo considerado. Com relação aos resultados com argamassa, a resistência ao cisalhamento das situações estudadas sem argamassa de ligação é menor em torno de 20% no caso de testemunhos prismáticos e 30% no de cilíndricos.
- Os resultados dos corpos-de-prova moldados são indiferentes nos casos estudados com e sem argamassa. No caso de comparação dos resultados em testemunhos com os corpos-de-prova moldados, nesta simulação com dados limitados, não há condições de segregar os efeitos do processo de moldagem ou do traumatismo causado pela extração.

6.5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Os resultados do programa experimental desenvolvido, que estão resumidos nos itens anteriores, permitem que se efetuem comparações de modo a verificar as possíveis correlações existentes, bem como a consistência geral do processo desenvolvido.

6.5.1 Parâmetros de Resistência do Maciço de CCR entre juntas

Para que o processo seja validado, torna-se importante comparar os resultados obtidos no controle de qualidade da obra (MOSER et al., 2003), com aqueles obtidos durante a moldagem dos vários maciços experimentais, bem como com os estudos executados em testemunhos do protótipo. A Tabela 6.26 apresenta um resumo com os resultados de resistência à compressão obtidos dos corpos-de-prova moldados e testemunhos cilíndricos durante a execução do projeto experimental desta tese e durante a execução da obra para o mesmo traço.

TABELA 6.26 Comparação dos Resultados de Resistência à Compressão nas Diversas Idades do Programa Experimental com os Dados dos Corpos-de-prova Moldados da Obra

| IDADE | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | PROGRAMA EXPERIMENTAL | | | OBRA |
|-------|--------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|------------|
| | | cp's Moldados | Testemunhos An.Camadas | Testemunhos Est. Compl. I | CQ(*) Obra |
| 7 | Média (MPa) | 2,33 | | | 2,5 |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,24 | | | 0,29 |
| | Coeficiente Variação (%) | 10 | | | 11 |
| 28 | Média (MPa) | 4,53 | | | 4,8 |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,76 | | | 0,40 |
| | Coeficiente Variação (%) | 17 | | | 8 |
| 90 | Média (MPa) | 8,32 | | | 8,6 |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,66 | | | 1,02 |
| | Coeficiente Variação (%) | 8 | | | 12 |
| 120 | Média (MPa) | 9,9 | 6,65 | | |
| | Desvio Padrão (MPa) | 2,08 | 1,31 | | |
| | Coeficiente Variação (%) | 21 | 20 | | |
| 180 | Média (MPa) | 10,71 | 7,8 | 8,7 | 11,2 |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,96 | 1,26 | 0,5 | 1,32 |
| | Coeficiente Variação (%) | 9 | 16 | 6 | 12 |
| 365 | Média (MPa) | | 8,78 | | |
| | Desvio Padrão (MPa) | | 2,05 | | |
| | Coeficiente Variação (%) | | 23% | | |

(*)CQ: indica resultados de ensaios de corpos-de-prova moldados na obra para efeito de controle de qualidade

Os resultados mostram-se compatíveis tanto no valor absoluto da resistência quanto nos desvios padrão dos diversos processos. A Tabela 6.26 mostra uma perda de resistência nos testemunhos, gerada pelo traumatismo do processo de sua obtenção, de aproximadamente 30%.

A Tabela 6.27 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios para determinação da massa específica, onde se verifica que as massa específicas obtidas são bastante semelhantes, mostrando a eficiência do processo de execução de maciços em laboratório como simulação da situação do protótipo.

TABELA 6.27 Comparação dos Ensaios de Massa Específica do Programa Experimental com os Dados dos Corpos-de-prova Moldados da Obra

| IDADE | MASSA ESPECÍFICA | PROGRAMA EXPERIMENTAL | | | OBRA |
|-------|------------------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|----------|
| | | cp's Moldados | Testemunhos An.Camadas | Testemunhos Est. Compl. I | CQ Obra |
| 7 | Média (kg/m ³) | 2524 | | | |
| | Desvio Padrão (kg/m ³) | 17 | | | |
| | Coeficiente Variação (%) | 1% | | | |
| 28 | Média (kg/m ³) | 2542 | | | |
| | Desvio Padrão (kg/m ³) | 14 | | | |
| | Coeficiente Variação (%) | 1% | | | |
| 90 | Média (kg/m ³) | 2538 | | | |
| | Desvio Padrão (kg/m ³) | 15 | | | |
| | Coeficiente Variação (%) | 1 | | | |
| 120 | Média (kg/m ³) | 2525 | 2517 | | |
| | Desvio Padrão (kg/m ³) | 8 | 17 | | |
| | Coeficiente Variação (%) | 0 | 1 | | |
| 180 | Média (kg/m ³) | 2539 | 2519 | 2547 | 2512 (*) |
| | Desvio Padrão (kg/m ³) | 25 | 40 | 12 | 18 (*) |
| | Coeficiente Variação (%) | 1 | 2 | 0 | 1 |
| 365 | Média (kg/m ³) | | 2513 | | |
| | Desvio Padrão (kg/m ³) | | 43 | | |
| | Coeficiente Variação (%) | | 2 | | |

(*) Resumo de Resultado em várias idades

O programa de controle de qualidade da obra não considerou a verificação dos resultados de resistência à tração do CCR. Porém para efeito de pesquisa, sua determinação é muito importante, pois a resistência à tração é considerada no projeto de barragens de concreto, bem como aumentam os subsídios para analisar o efeito do traumatismo existente na extração de testemunhos.

As Tabelas 6.28, 6.29 e 6.30 apresentam resumos estatísticos com os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração direta e de módulo de elasticidade, respectivamente, para o maciço de CCR entre juntas de construção.

TABELA 6.28 Comparação dos Ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral para o Maciço fora das Juntas entre Corpos-de-prova Moldados e Testemunhos Cilíndricos

| IDADE | RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL | PROGRAMA EXPERIMENTAL | |
|-------|---|-----------------------|------------------------|
| | | cp's Moldados | Testemunhos An.Camadas |
| 7 | Média (MPa) | 0,23 | |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,07 | |
| | Coeficiente Variação (%) | 30 | |
| 28 | Média (MPa) | 0,64 | |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,07 | |
| | Coeficiente Variação (%) | 11 | |
| 90 | Média (MPa) | 1,24 | |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,1 | |
| | Coeficiente Variação (%) | 8 | |
| 120 | Média (MPa) | 1,43 | 1,23 |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,23 | 0,31 |
| | Coeficiente Variação (%) | 16 | 25 |
| 180 | Média (MPa) | 1,68 | 1,07 |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,16 | 0,3 |
| | Coeficiente Variação (%) | 9 | 28 |
| 365 | Média (MPa) | | 1,00 |
| | Desvio Padrão (MPa) | | 0,29 |
| | Coeficiente Variação (%) | | 29 |

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral mostram dispersões mais intensas nos resultados dos testemunhos, geradas provavelmente durante a obtenção dos corpos-de-prova, e resistência menores. Esta dispersão mostra resultados incoerentemente menores com o aumento da idade nos testemunhos, que na idade de controle de 120 dias têm 64% da resistência dos corpos-de-prova moldados.

TABELA 6.29 Comparação dos Ensaios de Resistência à Tração Direta para o Maciço fora das Juntas entre Corpos-de-prova Moldados e Testemunhos Cilíndricos

| IDADE | RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA | PROGRAMA EXPERIMENTAL | | |
|-------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| | | cp's Moldados | Testemunhos An.Camadas | Testemunhos Est. Compl. I |
| 7 | Média (MPa) | 0,18 | | |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,07 | | |
| | Coeficiente Variação (%) | 40 | | |
| 28 | Média (MPa) | 0,42 | | |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,1 | | |
| | Coeficiente Variação (%) | 2 | | |
| 90 | Média (MPa) | 0,77 | | |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,08 | | |
| | Coeficiente Variação (%) | 10 | | |
| 120 | Média (MPa) | 0,98 | 0,74 | |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,12 | 0,06 | |
| | Coeficiente Variação (%) | 12 | 35 | |
| 180 | Média (MPa) | 1,11 | 0,6 | 0,5 |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,07 | 0,2 | 0,1 |
| | Coeficiente Variação (%) | 6 | 34 | 21 |
| 365 | Média (MPa) | | 0,48 | |
| | Desvio Padrão (MPa) | | 0,25 | |
| | Coeficiente Variação (%) | | 53 | |

De maneira análoga à comparação dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, às dispersões de resultados nos ensaios de resistência à tração direta em testemunhos são superiores aos equivalentes em corpos-de-prova moldados. Também de maneira incoerente os resultados são menores nas idades mais avançadas. Os resultados nos testemunhos forneceram valores entre 54% e 75% dos valores obtidos em corpos-de-prova moldados.

Como intuído, os ensaios de resistência à tração mostram-se mais suscetíveis aos efeitos dos procedimentos de extração e usinagem que os ensaios de resistência à compressão. Apesar das dificuldades já discutidas nos ensaios de tração direta, os resultados obtidos mostram com dispersões da mesma ordem que os ensaios de compressão diametral, indicando que pesquisas para melhorar a confiabilidade destes ensaios são interessantes. Em termos de Europa, vários

estudos e proposições neste tipo de ensaio foram desenvolvidos por RIBEIRO em 1998; RIBEIRO et al. em 2001 e 2003; e, OLIVARES et al., em 2003.

TABELA 6.30 Comparação dos Ensaio de Módulo de Elasticidade para o Maciço fora das Juntas entre Corpos-de-prova Moldados e Testemunhos Cilíndricos

| IDADE | MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa) | PROGRAMA EXPERIMENTAL | | |
|-------|------------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| | | cp's Moldados | Testemunhos An.Camadas | Testemunhos Est. Compl. I |
| 7 | Média (GPa) | 5,6 | | |
| | Desvio Padrão (GPa) | 2,76 | | |
| | Coeficiente Variação (%) | 49% | | |
| 28 | Média (GPa) | 16,88 | | |
| | Desvio Padrão (GPa) | 5,41 | | |
| | Coeficiente Variação (%) | 32% | | |
| 90 | Média (GPa) | 24,51 | | |
| | Desvio Padrão (GPa) | 4,84 | | |
| | Coeficiente Variação (%) | 20% | | |
| 120 | Média (GPa) | 33,56 | 12,13 | |
| | Desvio Padrão (GPa) | 4,74 | 3,6 | |
| | Coeficiente Variação (%) | 14% | 30 | |
| 180 | Média (GPa) | 34,4 | 13 | 15,3 |
| | Desvio Padrão (GPa) | 4,69 | 4,59 | 2,71 |
| | Coeficiente Variação (%) | 14% | 35% | 18% |
| 365 | Média (GPa) | | 12,15 | |
| | Desvio Padrão (GPa) | | 4,9 | |
| | Coeficiente Variação (%) | | 40% | |

A Tabela 6.30 indica que os módulos de elasticidade mostram-se mais suscetíveis aos efeitos do manuseio necessário à obtenção dos testemunhos e à usinagem posterior. Os resultados apresentam valores 65% menores que os obtidos em corpos-de-prova moldados. O mapeamento dos fenômenos que interferem nos processos de determinação do módulo de elasticidade em corpos-de-prova obtidos de testemunhos deve ser feito através de novas pesquisas sobre o assunto.

6.5.2 Parâmetros de Resistência do Maciço de CCR Comparados com Testemunhos do Protótipo

Durante a construção da barragem da UHE Dona Francisca foi executada um programa de extração de testemunhos para verificação do resultado final obtido. Durante os ensaios para sua caracterização física, surgiram alguns problemas no manuseio, com grande parte dos testemunhos sofrendo traumatismo por ciclo de aquecimento e resfriamento. Apesar desta dificuldade, foi possível obter alguns resultados, que após tratamento estatístico podem ser comparados com os resultados deste programa experimental, procurando validar a simulação em laboratório. As Tabelas 6.31 e 6.32 apresentam uma comparação entre os resultados de ensaios em testemunhos e em corpos-de-prova moldados, respectivamente, do programa de análise de camadas com os resultados do protótipo.

TABELA 6.31 Comparação de Resultados de Testemunhos do Programa Experimental para Análise de Camadas com Testemunhos do Protótipo

| GRANDEZA (~180dias) | | An. Camadas (A) | Result. Campo (B) | A/B |
|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------|------|
| Resistência à Compressão | Média (MPa) | 7,80 | 7,9 | 0,99 |
| | Desvio Padrão (MPa) | 1,26 | 2,2 | -- |
| | Coef. Variação (%) | 16 | 28 | -- |
| | número de ensaios | 45 | 6 | -- |
| Massa Específica | Média (kg/m ³) | 2519 | 2535 | 0,99 |
| | Desvio Padrão (kg/m ³) | 40 | 33 | -- |
| | Coef. Variação (%) | 2 | 1 | -- |
| | número de ensaios | 37 | 34 | -- |

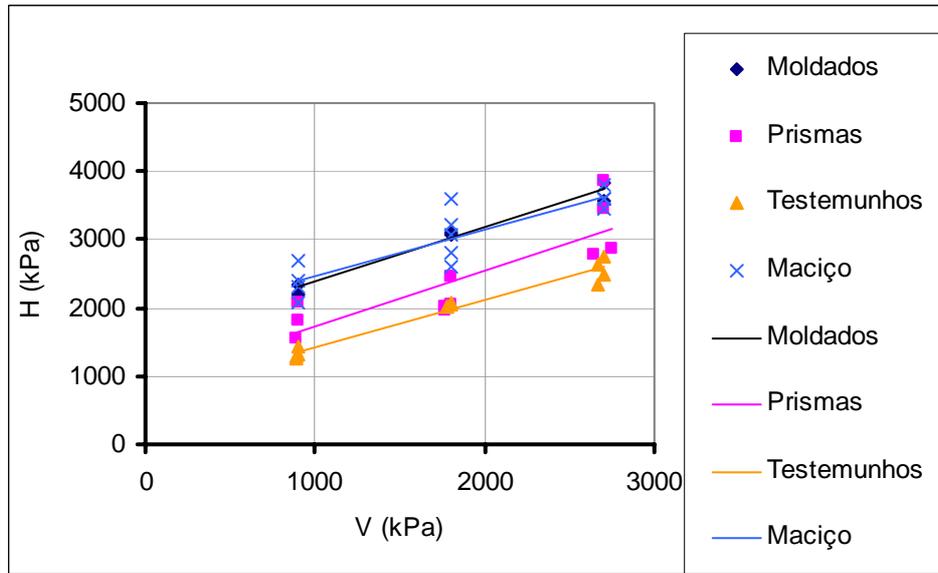
TABELA 6.32 Comparação de Resultados de Corpos-de-Prova Moldados do Programa Experimental para Análise de Camadas com os equivalentes do Protótipo

| GRANDEZA (180dias) | | An. Camadas (A) | Result. Campo (B) | A/B |
|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------|------|
| Resistência à Compressão | Média (MPa) | 10,71 | 11,2 | 0,96 |
| | Desvio Padrão (MPa) | 0,96 | 1,32 | -- |
| | Coef. Variação (%) | 9 | 12 | -- |
| | número de ensaios | 12 | 26 | -- |
| Massa Específica | Média (kg/m ³) | 2539 | 2512 | 1,01 |
| | Desvio Padrão (kg/m ³) | 25 | 18 | -- |
| | Coef. Variação (%) | 1 | 0 | -- |
| | número de ensaios | 14 | 26 | -- |

Os resultados apresentados nas duas tabelas anteriores mostram que os resultados da simulação em laboratório são similares aos resultados do campo, mostrando que o processo experimental é coerente.

6.5.3 Comparação dos Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto

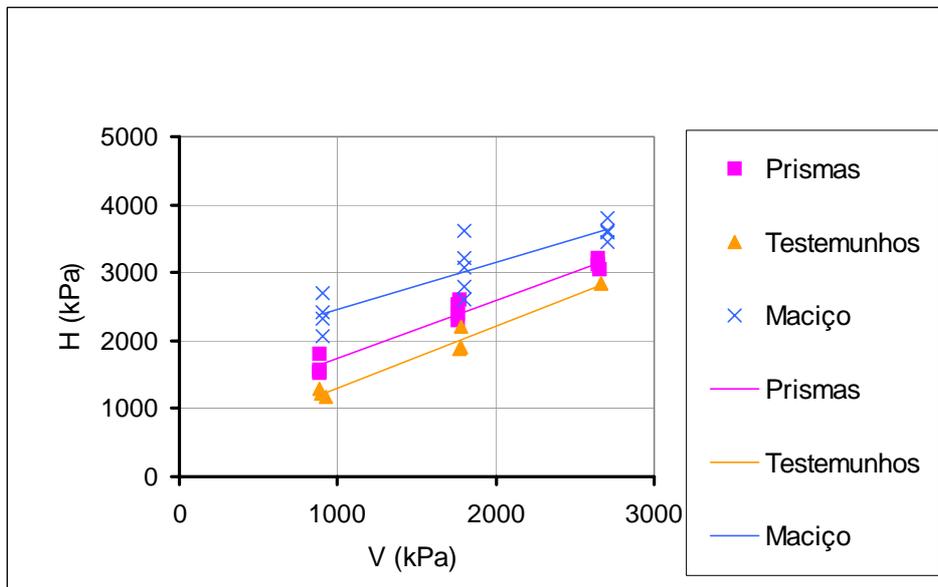
Como já discutido anteriormente, os valores de coesão e ângulo de atrito são muito suscetíveis às variações dos resultados para cada tensão. Este fato é minorado aumentando-se a quantidade de ensaios de cisalhamento. Para avaliação dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto, as Figuras 6.31 a 6.33 comparam os diversos resultados obtidos, colocando num mesmo gráfico as envoltórias de resistência para corpos-de-prova moldados, prismáticos e testemunhos obtidos durante a execução dos maciços experimentais para o segundo programa complementar; e, as envoltórias dos ensaios em testemunhos obtidos no maciço de CCR entre camadas.



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.31 Comparação das Envoltórias de Resistência entre o Programa Complementar II e a Análise de Camadas

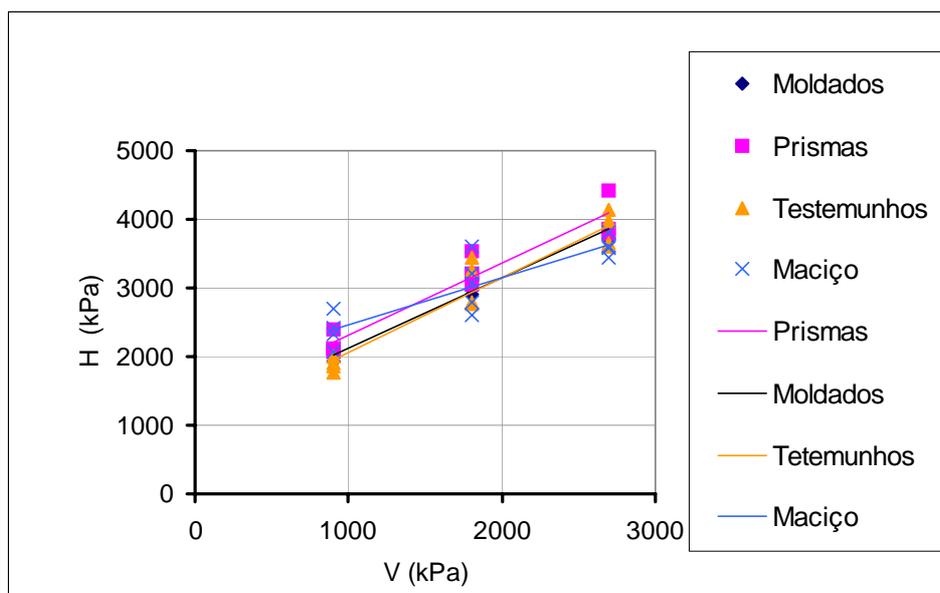
Sem Argamassa; Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; Temperatura da Superfície: 25°C; e Intervalo de 4hs



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.32 Comparação das Envoltórias de Resistência entre o Programa Complementar II e a Análise de Camadas

Sem Argamassa; Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; Temperatura da Superfície: 25°C; e Intervalo de 8hs



Legenda: V: Tensão Normal na seção ensaiada
H: Tensão Tangencial na seção ensaiada

FIGURA 6.33 Comparação das Envolvórias de Resistência entre o Programa Complementar II e a Análise de Camadas
Com Argamassa; Idade: 120 dias; Tratamento de Camada: Ar Comprimido; Temperatura da Superfície: 25°C; e Intervalo de 24hs

HESS apresentou vários resultados de envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb e de resistência à tração direta de juntas e do maciço de CCR em 1999 obtidas em testemunhos cilíndricos de 150 mm de diâmetro, apresentados na Tabela 6.33.

TABELA 6.33 Resultados de Envoltória de Resistência - Obras Citadas em HESS, 1999

| BARRAGEM | CONSUMO (kg/m ³) | TRAT. JUNTA | COESÃO (MPa) | ÂNG. DE ATRITO (graus) |
|----------------|------------------------------|-------------|--------------|------------------------|
| Zintel Canyon | 74 | Maciço | 2,00 | 56 |
| | | S/ Mistura | 0,59 | 56 |
| | | C/ Mistura | 1,38 | 54 |
| Cuchillo Negro | 136 | Maciço | 2,51 | 50 |
| | | S/ Mistura | 0,85 | 63 |
| | | C/ Mistura | 1,74 | 57 |
| Cache Creek | 177 | Maciço | 5,43 | 44 |
| | | S/ Mistura | 2,27 | 48 |
| | | C/ Mistura | 1,73 | 43 |
| Elk Creek | 103 | Maciço | 3,01 | 63 |
| | | C/ Mistura | 2,84 | 65 |

TABELA 6.34 Comparação dos Resultados Obras Citadas por HESS, 1999, com relação à Aplicação de Misturas de Ligação

| TRATAMENTO JUNTAS | TENSÃO DE CISALHAMENTO (kPa) | | | RELAÇÃO TRATAMENTO/MACIÇO | | |
|-------------------|------------------------------|------|------|---------------------------|------|------|
| | 900 | 1800 | 2700 | 900 | 1800 | 2700 |
| Zintel Canyon | | | | | | |
| Maciço | 3334 | 4669 | 6003 | | | |
| S/ Mistura | 1924 | 3259 | 4593 | 58% | 70% | 77% |
| C/ Mistura | 2619 | 3857 | 5096 | 79% | 83% | 85% |
| Cuchillo Negro | | | | | | |
| Maciço | 3583 | 4655 | 5728 | | | |
| S/ Mistura | 2616 | 4383 | 6149 | 73% | 94% | 107% |
| C/ Mistura | 3126 | 4512 | 5898 | 87% | 97% | 103% |
| Cache Creek | | | | | | |
| Maciço | 6299 | 7168 | 8037 | | | |
| S/ Mistura | 3270 | 4269 | 5269 | 52% | 60% | 66% |
| C/ Mistura | 2569 | 3409 | 4248 | 41% | 48% | 53% |
| ElkCreek | | | | | | |
| Maciço | 4776 | 6543 | 8309 | | | |
| C/ Mistura | 4770 | 6700 | 8630 | 100% | 102% | 104% |

Nestas barragens o consumo mínimo de cimento Portland foi igual a 70 kg/m^3 , superior à média dos resultados de Dona Francisca. Não há informação sobre a petrografia dos agregados utilizados, ou sobre a quantidade de filer no mesmo, tampouco sobre a mistura de ligação empregada. Mesmo com estas diferenças significativas, verifica-se que os resultados obtidos até o momento neste trabalho são coerentes com a maioria dos resultados apresentados na Tabela 6.34. As perdas de resistência nos caso sem aplicação de argamassa são em dois casos muito semelhantes aos valores obtidos na tese, apresentando melhoria de resistência com o crescimento do esforço normal, pela menor influência da coesão.

O programa Experimental Complementar I teve grande quantidade de repetições, permitindo uma análise relativa dos ensaios de resistência mecânica à compressão e à tração em relação aos valores obtidos nos ensaios de cisalhamento direto. Os resultados são muito semelhantes aos resultados apresentados em HESS, 1999:

- A resistência à tração direta é equivalente à 5,7% do valor da resistência à compressão. Os estudos de FORBES e WILLIAMS de 1998 apud HESS, 1999, levaram ao valor médio de 5% para a mesma relação.

- A coesão tem valor igual a 98% da resistência à tração por compressão diametral, e igual a 5,6% do resultado de resistência à compressão. Esta última relação foi igual a 6% em Zintel Canyon, 5% em Cuchillo Negro e 10% em Cache Creek.

Para servir de apoio a futuras pesquisas e para aumentar a base de dados para projeto, a Tabela 6.35 mostra os resultados de ensaios de módulo de elasticidade comparados com os valores recomendados pela Norma Brasileira NBR 6118 para o módulo de elasticidade tangente, cuja expressão está apresentada na Equação 6.2.

$$E = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa}) \quad (6.2)$$

TABELA 6.35 Resultados de Módulo de Elasticidade comparados com NBR 6118

| IDADE | MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa) | | | | | |
|-------|------------------------------|----------|---------------------------|----------|---------------------------|----------|
| | cp's moldados | | Testemunhos - An. Camadas | | Testemunhos Est. Compl. I | |
| | ENSAIO | NBR 6118 | ENSAIO | NBR 6118 | ENSAIO | NBR 6118 |
| 7 | 5,6 | 8,55 | | | | |
| 28 | 16,88 | 11,92 | | | | |
| 90 | 24,51 | 15,99 | | | | |
| 120 | 33,56 | 17,62 | 12,13 | 14,44 | | |
| 180 | 34,4 | 18,04 | 13,00 | 15,64 | 15,3 | 18,74 |
| 365 | | | 12,15 | 16,59 | | |

6.5.4 Considerações sobre as Comparações Efetuadas

Os itens 6.1 a 6.4 permitiram analisar os principais parâmetros dentro dos limites experimentais propostos, considerando também alternativas para a obtenção de testemunhos. Com esses dados obtidos e com os tratamentos matemáticos efetuados, foram desenvolvidas várias análises, que foram completadas pelas comparações agora em estudo, que permitem as considerações abaixo listadas.

- Comparando os vários ensaios de caracterização física, verifica-se que os resultados obtidos são coerentes, levando a conclusão que a simulação em laboratório fornece dados consistentes com os obtidos no controle de qualidade de obra e entre si. A comparação dos parâmetros de resistência à compressão e de massa específica obtidos em testemunhos no protótipo e nos maciços experimentais em laboratório são similares, assim como os resultados dos controles de qualidade efetuados em corpos-de-prova moldados.
- As simulações de juntas em corpos-de-prova moldados mostram não haver diferença estatisticamente comprovada entre os resultados de envoltória de resistência do maciço integral e em juntas com 4 horas de intervalo de lançamento. Este valor não é acompanhado pelos resultados nos maciços experimentais, conforme discutido e quantificado anteriormente. Os resultados não permitem avaliar a parcela de perda de resistência gerada pela obtenção e manuseio dos testemunhos, ou aquela oriunda das dificuldades de preparação da superfície superior das camadas.
- Os ensaios de cisalhamento nos testemunhos em forma de prismas fornecem resultados de resistência ao cisalhamento maiores que seus equivalentes cilíndricos, conforme já discutido. Com a aplicação de argamassa de ligação, nos intervalos de tempo de lançamento considerados, os resultados ficam semelhantes entre si e similares aos do maciço fora da junta. A utilização de argamassa de ligação produz tendência de homogeneização dos parâmetros de resistência entre camadas, deixando-os com resultados análogos aos do maciço fora das juntas, indo de encontro às conclusões de PACELLI DE ANDRADE et al. em 1993.
- A Tabela 6.36 compara os resultados do estudo de testemunhos prismáticos com os do maciço de CCR matriz, sem a presença de juntas de construção, segregados por tensão normal de ensaio. A tendência de aumento da relação entre as resistências com o aumento de força normal, provavelmente pela menor contribuição relativa da coesão na resistência ao cisalhamento.
- A tabela evidencia a semelhança dos resultados para intervalos de tempo de 4 e de 8 horas entre lançamentos sucessivos. PACELLI DE ANDRADE et al. (1993), já

discutiram a perda significativa de resistência para intervalos de tempo superiores a 8 horas estudando as ensecadeiras da UHE Serra da Mesa, em Goiás.

TABELA 6.36 Comparação dos Resultados do Programa Experimental Complementar II por Tensão Normal com o Maciço Fora da Junta (Matriz de CCR)

| INTERV. DE LANÇAMENTO ARGAMASSA DE LIGAÇÃO | PARÂMETRO | TENSÃO NORMAL (kPa) | | |
|---|-------------|---------------------|------|------|
| | | 900 | 1800 | 2700 |
| Testemunhos do Maciço Fora da Junta (Matriz) | | | | |
| Sem Junta | H (kPa) | 2346 | 2960 | 3575 |
| Testemunhos Prismáticos | | | | |
| 4h – sem argamassa | Média (kPa) | 1814 | 2118 | 3237 |
| | % Matriz | 77 | 72 | 91 |
| 8h – sem argamassa | Média (kPa) | 1617 | 2455 | 3108 |
| | % Matriz | 69 | 83 | 87 |
| 24h – com argamassa | Média (kPa) | 2173 | 3147 | 4022 |
| | % Matriz | 93 | 106 | 113 |
| Testemunhos Cilíndricos | | | | |
| 4h – sem argamassa | Média (kPa) | 1324 | 2041 | 2615 |
| | % Matriz) | 56 | 69 | 73 |
| 8h – sem argamassa | Média (kPa) | 1237 | 1992 | 2841 |
| | % Matriz | 53 | 67 | 79 |
| 24h – com argamassa | Média (kPa) | 1882 | 3070 | 3837 |
| | % Matriz | 80 | 104 | 107 |
| Corpos-de-Prova Moldados | | | | |
| 4h – sem argamassa | Média (kPa) | 2267 | 3097 | 3699 |
| | % Matriz | 97 | 105 | 103 |
| 24h – com argamassa | Média (kPa) | 1929 | 3036 | 3802 |
| | % Matriz | 82 | 103 | 106 |

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho procurou avaliar as propriedades do CCR em estado fresco e endurecido utilizando resultados obtidos em maciços experimentais compactados em laboratório, e comparando-os com os resultados obtidos durante a execução da barragem da UHE Dona Francisca, no Rio Grande do Sul. Foram analisados os resultados de massa específica, resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, módulo de elasticidade e resistências à tração direta e por compressão diametral. Os ensaios de cisalhamento direto possibilitaram a obtenção das envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb entre camadas de concretagem, variando o intervalo de lançamentos sucessivos, tratamento superficial, o efeito da utilização de argamassa de ligação e o efeito da temperatura de exposição da camada.

Os resultados apresentados se mostraram consistentes entre si, e coerentes com os resultados apresentados pela maior parte da bibliografia consultada, porém são decorrentes de um estudo particular, reproduzindo um dos traços utilizados na construção da obra previamente mencionada, com os mesmos materiais nela empregados. Sua utilização ou extrapolação deve ser cautelosa, consultando resultados de obras ou pesquisas similares à nova situação em análise, e/ou propondo o programa experimental necessário.

7.1 CONCLUSÕES

As diversas análises efetuadas no decorrer deste trabalho, juntamente com as comparações feitas com os dados do controle de qualidade do protótipo e da bibliografia existente, permitem listar as seguintes conclusões:

- Comparando os resultados de caracterização física do material estudado, verifica-se que os maciços experimentais compactados em laboratório fornecem resultados semelhantes aos obtidos no protótipo, indicando que simulam adequadamente os procedimentos do campo.
- Os testemunhos apresentam uma perda de resistência à compressão em torno de 30% em relação aos resultados obtidos para os corpos-de-prova moldados.
- Ensaios em corpos-de-prova moldados sem juntas mostram que a resistência à tração diametral corresponde aproximadamente a 15% da resistência à compressão para idades superiores aos 28 dias. Esta mesma relação no caso de resistência à tração

direta é aproximadamente 10%. Nos estudos realizados em testemunhos para verificação da resistência a tração de juntas com intervalo de tempo de lançamento de lançamento de 4 horas sem aplicação de argamassa de ligação, esta última relação diminuiu para 6% aos 120 dias

- Os estudos de módulo de elasticidade mostram que em corpos-de-prova moldados, seus resultados são substancialmente superiores aos valores recomendados pela NBR 6118 em função da resistência à compressão, com crescimento considerável até os 120 dias, ficando praticamente constantes após esta idade de controle. Nos testemunhos há uma diminuição nos resultados superior à 50%.
- Os resultados de superfície apicoada apresentam menores dispersões que às equivalentes considerando a limpeza simples com ar comprimido.
- Não houve comprovação da influência da variação de temperatura de exposição da camada nos parâmetros estudados.
- Juntas com intervalo de tempo entre 0 e 8 horas sem utilização de argamassa forneceram resultados semelhantes para todos os tratamentos de superfície considerados, não sendo possível diferenciá-los estatisticamente. Em contrapartida há uma diminuição considerável dos resultados da envoltória de resistência para intervalo de lançamento de 12 horas sem aplicação de argamassa de ligação.
- A utilização de argamassa uniformiza os resultados, obtendo envoltórias de resistência muito semelhantes, para variações do intervalo de tempo de lançamento entre 8 e 48 horas.
- Na determinação das envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb, quando do cálculo das regressões lineares individuais, pequenas variações em qualquer tensão normal considerada podem alterar significativamente os resultados de coesão e ângulo de atrito. Para permitir maior confiabilidade na análise, este trabalho propôs análises separadas para os três níveis de tensão normal preconizados nos ensaios de cisalhamento direto. Em comparação com os resultados em testemunhos na matriz de CCR, a perda de resistência devido às juntas é menos intensa com o aumento da tensão normal do ensaio, pois a influência relativa da coesão na resistência ao cisalhamento diminui. Para esta condição de tratamento de junta obteve-se a seguinte expressão para a envoltória de resistência:

$$\tau = 0,49 + \sigma.tg39,5^\circ \text{ (em MPa)}$$

- O Programa Experimental Complementar I, com 15 repetições para o mesmo tipo de tratamento de camada, permitiu a comparação da envoltória de resistência com intervalo de tempo entre lançamento sucessivos igual a 4 horas sem aplicação de argamassa com àquela correspondente aos testemunhos fora da região das juntas. Observa-se que a junta leva a uma diminuição da resistência ao cisalhamento da ordem de 50%, estando inclusos nestes valores o efeito do traumatismo na junta causado pela extração e usinagem dos testemunhos.
- Para as mesmas condições de execução de ensaios, os resultados obtidos nos testemunhos prismáticos são sistematicamente superiores àqueles gerados pelos testemunhos cilíndricos, comprovando a importância dos tamanhos e processo de obtenção dos corpos-de-prova. Em situações sem utilização de argamassa de ligação, dependendo do nível de tensões normais esta perda é da ordem de 20%. Os resultados das juntas com argamassa com intervalo de tempo de 24h, este efeito mostrou-se atenuado, obtendo-se perdas de resistência significativamente menores. Como os resultados do programa experimental para análise entre camadas mostram uma uniformização de parâmetros de cisalhamento quando da utilização de argamassa quaisquer que sejam os intervalos de tempo, existe uma tendência de que esta atenuação dos efeitos da extração se estenda a todos os intervalos considerados. A aplicação de argamassa de ligação é bastante efetiva para o intervalo de tempo considerado. Com relação aos resultados com argamassa, a resistência ao cisalhamento das situações estudadas sem argamassa de ligação é menor em torno de 20% no caso de testemunhos prismáticos e 30% no de cilíndricos.
- Os resultados das envoltórias de resistência mostram que em todos os casos os resultados são muito superiores aos de envoltória de resistência de Mohr-Coulomb com coesão nula e ângulo de atrito de 45°, valores comumente usados em análise preliminares neste tipo de empreendimento.

Os resultados acima são coerentes com os resultados de obras semelhantes, e são consistentes com as expectativas inicialmente existentes quando da formulação do projeto experimental. Apresenta-se como notável o conjunto de resultados obtidos para os parâmetros de resistência da interface entre as camadas sem aplicação de argamassa para um intervalo de

lançamento de 8h, indicando que as limitações usualmente adotadas para a não utilização de argamassa em torno de 4h de intervalo entre lançamentos sucessivos possam ser conservadoras. Abre-se a possibilidade de uma série de pesquisas para vários materiais visando a determinação do intervalo de lançamento máximo sem que seja imperiosa a aplicação de argamassa, fato importante para a adoção do processo rampado de execução do CCR, e que pode levar a economia considerável nos futuros aproveitamentos hidrelétricos.

Como a taxa diária de colocação do concreto compactado com rolo é expressiva, decisões sem o conhecimento prévio do material perante as possíveis variabilidades do processo levam a soluções conservadoras já que qualquer não-conformidade passa a ter conseqüências catastróficas. Conclui-se que a execução de maciços experimentais em laboratório se constitui em uma ferramenta importante para a previsão de parâmetros do concreto compactado com rolo, auxiliando no processo de dosagem e de otimização do consumo de cimento, da granulometria, e, conseqüentemente, dos custos sem prejuízo da durabilidade da obra. Os maciços de laboratório permitem, também, a flexibilização de ensaios que permitam a avaliação dos diversos fatores que interferem nos parâmetros de resistência do concreto que seriam de difícil execução no campo, permitindo uma confiabilidade maior dos processos executivos e um incremento contínuo do conhecimento do material.

7.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Provada a capacidade de simulação das condições de campo, abrem-se várias perspectivas de pesquisa, abaixo estão listadas algumas destas possibilidades.

- Determinação do intervalo de tempo máximo que permita a concretagem sem espalhamento de argamassa de ligação, para vários tipos de agregados e dosagens.
- Determinação de correlações dos ensaios de tração direta com os resultados de envoltória de resistência. Comparação dos diversos processos de ensaio de tração direta, para otimização e aumento de sua confiabilidade.
- Mapeamento das características de permeabilidade para geração de critérios para utilização de CCR na face de montante.
- Pesquisa sobre permeabilidade pelas juntas de concretagem através de ensaios em testemunhos horizontais.

- Pesquisa em corpos-de-prova moldados executados em duas etapas, simulando junta entre camadas e correlacionando-os com resultados de resistência à tração e ao cisalhamento, obtidos em maciços experimentais em laboratório.
- Parametrização de métodos para obtenção de material menos permeável, como o processo de enriquecimento de CCR com argamassa ou calda de cimento.
- Programas semelhantes ao desta tese com materiais e dosagens variadas, de modo a aumentar o banco de dados do processo.
- Criação de bancos de dados inter-relacionais, análogos ao processo de redes neurais, para obtenção de leis gerais de comportamento do CCR.
- Programa para avaliação da influência do tamanho dos corpos-de-prova, serrando os maciços experimentais e testando os corpos-de-prova com várias dimensões em aparatos que permitam a aplicação de esforços verticais e horizontais, a exemplo dos ensaios em rochas.
- Determinação do modelo reológico do CCR.
- Estudos das fragilidades da zona de transição em CCR através da micrografia eletrônica de varredura.
- Determinação do tempo de pega através de estudos utilizando ultra-som, e verificação de sua aplicação na determinação da necessidade de utilização de argamassa e na avaliação dos parâmetros de resistência.
- Caracterização das deformações do CCR ao longo do tempo através de ensaios de fluência.
- Caracterização das propriedades mecânicas nas interfaces concreto convencional CCR.
- Análise de resistência ao cisalhamento através de ensaios de compressão em testemunhos inclinados em relação às camadas de concretagem.
- Desenvolvimento de equipamentos manuais para execução de ensaios de cisalhamento direto.
- Aprofundamento de estudos para avaliação do traumatismo devido à extração de testemunhos, variando idade, intervalo de tempo entre moldagem e extração, idade, e composição do CCR.

- Estudos triaxiais para determinação da envoltória de resistência, comparando-os com os ensaios de cisalhamento direto para vários materiais e condições de contorno das camadas.
- Ensaios de cisalhamento *in situ* e sua comparação com os resultados obtidos em laboratório para várias dimensões de corpos-de-prova moldados e diferentes tipos de testemunhos.
- Avaliação dos fenômenos de vento e evaporação da camada para otimização da simulação em laboratório, além de analisar criticamente o conceito de maturidade do CCR.

REFERÊNCIAS CITADAS

ABGE – “Boletim Técnico N° 4”- Associação de Geologia de Engenharia - 1996

ACI – COMMITTEE 207 – “Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures” – American Concrete Institute

ACI – COMMITTEE 211 – “Recommended Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete” - American Concrete Institute

ACI COMMITTEE 207.2R – “Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete” – ACI American Concrete Institute, ACI Manual of Concrete Practice, Detroit - 1995

AHMED, A. E. – “Does Core Size Affect Strength Tests?” – Concrete International - 1999

ALMEIDA, R.- "Forma Tecnológica: As Novidades Reveladas pela Usina Angolana"-Revista Construção 2252, 1991

ALONSO-FRANCO, M.; JOFRE, C. – “RCC Dams in Spain - Present and Future” - Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain – 2003.

altd",-International Water Power & Dam Construction. United Kingdom, -1988

ANDRADE, M. A. S.; PIMENTA, M. A.; BITTENCOURT, R. M.; FONSECA, A. C.; FONTOURA, J. T. F.; PACELLI DE ANDRADE, W. – “DMA - A Simple Device for Measuring Unit Water in RCC Mixtures” - Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain - 2003

ANDRIOLO F.R; MOSER, D. E.; MUSSI, J. M. P. -"Water Reducer and Set Retarder Admixture Use in RCC Mix-Properties and Benefits",- International Symposium on Roller Compacted Concrete Dam, China. – 1999

ANDRIOLO, F. R. – “Contribuições para o Conhecimento e Desenvolvimento do Concreto Rolado” - Barber Greene, 1989

ANDRIOLO, F. R. - “The Use of Roller Compacted Concrete” - Oficina de Textos, São Paulo - 1998

ANDRIOLO, F. R.; SCHMIDT, M. T. - "The Capanda RCC Dam in Angola" - International Water Power & Dam Construction - 1992

ANDRIOLO, F. R.; SKWARCZYNSKI, T. M. – “Concreto Pré-Refrigerado no Brasil: Uma Evolução com Mais de 20 Anos” – Logos Engenharia S. A., São Paulo - 1988

ANDRIOLO, F. R.; VASCONCELES, G. R. L. de and GAMA, H. R. - "Use of Roller Compacted Concrete in Brazil",-Concrete International, ACI, Detroit, - 1984

ANGULO, C.; SCHRADER, E. K.; SANTANA, H.; CASTRO, G.; SALAZAR, H.; LÓPEZ, J. - "Miel-I Dam" - International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Santander, Spain - 1995

ANTUNES SOBRINHO, J.; ALBERTONI, S. C.; XAVIER, L. V.; FOES, P. A.; KREMPEL, A. F.; KUSTER, L. A. - "O Uso do CCR e Aspectos Hidráulicos da Viabilização da UHE Dona Francisca" - III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Foz do Iguaçu, - 1998

ASTM C 42/C43M-04 - "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete" - Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Col 04.02

BABÁ, L. J. N.; RAHUAN, L. F.; PIMENTA, M.A.; PINHEIRO, M. L.; BARBIN, A. S.; PACELLI DE ANDRADE, W. - "Roller Compacted Concrete from Cana brava Hydroelectric Plant"- International Conference on Roller Compacted Concrete Dam Construction in Middle East, Irbid, Jordânia - 2002

BACARA - Project National BaCaRa- 1988/1996 - "Roller Compacted Concrete-RCC Dams" - Presses de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.- 1997

BALLESTRERO, L. A.; GARRONE, J. R. - "Utilización Del HCR. en el Aprovechamiento Hidroeléctrico del Arroyo Uruguay-I" - XVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu, Brasil - 1989

BARLET, F. M.; MACGREGOR, J. G. - "Effect of Core-Length-to-Diameter Ratio on Concrete Core Strength"- ACI Material Journal, Vol. 91, Nº 4, 1994

BARTON, N.; BANDIS, S. - "Some Effects of Scale on the Shear Strength of Joints" - International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol 17, Pergamon Press Ltd., Great Britain - 1980

BASÍLIO, E. S. - "Agregados para Concreto", Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, Brasil - 1984

BATISTA, E. L., GRAÇA, N. G., BITTENCOURT, R. M.; ANDRADE, W. P. - "First Brazilian Experience Using the Advanced Sloped Layer Construction of RCC at Lajeado Dam" - USSD - 2002

BAYAN, B. J. - "Execution and Control of the Castiblanco de los Arroyos Dam with Roller Compacted Concrete" - Transactions, Sixteenth Congress on Large Dams, San Francisco - 1988

BITTENCOURT, R. M.; FONTOURA, J. T. F.; PACELLI DE ANDRADE, W.; MONTEIRO, P. J. M. - "Mass Concrete Mixtures Based on Fineness Modulus and Geometrical Gradation" - ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 13, nº 1, Reston - 2001

BLINDER, S.; TONIATTI, N. B.; KREMPEL, A. F. - "RCC and CFR Dams - Costs Comparison", - International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Santander, Spain, - 1995

BSI - BS 1881-120 - "Testing Concrete. Methods for Determination of the compressive Strength of Concrete Cores" - BSI British Standards, UK - 1983

BSI BS 1880-124 - "Testing concrete. Methods for Analysis of Hardened Concrete"- - BSI British Standards, UK - 1988

CAMPITELLI, L. - "Aproveitamento Hidrelétrico do Tucuruí"; "Aterro de Cascalho não Coesivo": "Proteção de Talude com Cascalho: Proteção de Talude com Solo-Cimento".- Proceedings of the XV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Rio de Janeiro, Brazil, - 1983

CANNON, R. W. - "Compaction of Mass Concrete with Vibratory Roller" - ACI Journal, Proceedings, Title n° 71-34. Detroit-1974

CANNON, R. W. - "Concrete Dam Construction Using Earth Compaction Methods" - Economical Construction of Concrete Dams - Proceedings, Engineering Foundation Research Conference, Pacific Grove, California: ASCE-1972

CARDOSO, H.; VILLAR GARCIA, J.; MARTINS RIBEIRO JR., W.; PRADO SILVA, J. M.; MULLER, P.; TREVISAN, A.; MENDES FRANCO, F.; CRUBELLATI LIMA, F.; PACELLI DE ANDRADE, W. – "Metodologia de Execução do Concreto Compactado com Rolo da UHE Santa Clara" – CBDB, IV Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Porto de Galinhas - 2004

CARLSON, R, W.; HOUGHTON, D. L.; POLIVIKA, M.-"Causes and Control of Cracking in Reinforced Mass Concrete" - Detroit-USA Journal, julho,1979, págs.821-837

CARMO, J. B. M.; FONTOURA, J. T. F.; ANDRADE, M. A. S.; ANDRADE, W. P. -"Estudo de Dosagens de Concreto Compactado a Rolo, Combinando Cimento e Agregado Pulverizado com Escória de Alto-Forno e Fly-Ash", - I Simpósio de Obras em Concreto Compactado Com Rolo. São Paulo, Brasil, - 1995

CASAGRANDE, A. – "Control Seepage through Foundations and Abutments of Dams" – First Rankine Lecture of the Institution of Civil Engineers, London -, 1961.

CASTRO, C. H.; NASCIMENTO, J. F. F., FONTOURA, J. T. F.; PINTO, R. S. – "Estudo da Eficiência da Argamassa de Ligação de Concreto Compactado com Rolo" – III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Foz do Iguaçu - 1998

CBDB – "Guia Básico de Segurança de Barragens" – São Paulo - 1999

CBDB-NRSP – "Guia Básico de Segurança de Barragens" – Comissão Regional de Segurança de Barragens do Núcleo Regional de São Paulo do Comitê Brasileiro de Barragens, Belo Horizonte - 1999

CBGB – "Registro Nacional de Barragens", CBGB, 1999

CBGB; ELETROBRÁS; IBRACON – "Concreto Massa no Brasil - Memória Técnica"- ELETROBRÁS, Rio de Janeiro-1989

CHONGGANG, S – "RCC Dams in China" – Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain - 2003

CHONGGANG, S. and DUNSTAN, M. R. H. - "The Development of RCC Dams throughout the World",-Symposium on RCC Dam sponsored by the Chinese Society of Hydroelectric Engineering, Beijing, China - 1991

COOKE, J. B. –"The Developments of Today CFRD Dams" – Proceedings of the Second Symposium on CFRD, Florianópolis - 1997

- COOKE, J. B. e SHERARD, J. L. – “Concrete Rockfill Dams – Design, Construction and Performance” – Proceedings ASCE Symposium, Detroit, USA - 1985
- CREAGER, W. P.; JUSTIN, J. D.; HINDES, J. – “Engineering for Dams”, John Wiley & Sons, Inc., New York – 1965
- CROW R. D. et al. - "Mix Design Investigation Roller Compacted Concrete Construction - Upper Stillwater Dam, Utah" - Research Report REC-ERC-84-15 Bureau of Reclamation. Denver, Colorado -1984
- DANTAS, J. E. E.; HOLANDA, F. G. -"CCR Uma Realidade Nacional - Açude público Saco de Nova Olinda- Paraíba-PB", - XVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Brasília. – 1987
- DIEZ –CASCÓN, J. – “General Report – Materials, in Roller Compacted Concrete Dams” - International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain - 1995
- DOELHER, F. D.; OLIVEIRA, G.; FERREIRA, M. C. N. F. - "Barragem de Caraíbas - CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais", - I Simpósio de Obras em Concreto Compactado Com Rolo, São Paulo. - 1995
- DOLEN, T. P.; RICHARDSON, A. T.; WHITE, W. R. - "Quality Control/Inspection Upper Stillwater Dam" - Roller Compacted Concrete II, Proceedings of the RCC Specialty Conference San Diego, California, ASCE. New York -1988
- DU, Z.; MA L. – “Construction of Jiangya RCC Dam” - International Symposium on Roller Compacted Concrete Dam, China - 1999
- DUNSTAN, M. R. H. - "Upper Stillwater Dam Trial Section" - Report to the U.S. Bureau of Bureau of Reclamation: Malcolm Dunstan & Associates, Devon, United Kingdom -1981
- DUNSTAN, M. R. H. – “Latest Development in RCC Dams”- International Symposium on Roller Compacted Concrete Dam, China - 1999
- DUNSTAN, M. R. H. – “Recent Developments in RCC Dams” – International Journal on Hydropower & Dams, United Kingdom – 1999a
- DUNSTAN, M. R. H. – “The state-of-art of dams in 2003 – An Update of ICOLD Bulletin Nº 125” - Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain - 2003
- DUNSTAN, M. R. H. -"Rolled Concrete with Particular Reference to its Use as a Hearting Material in Concrete Dams" - Draft Report of the Concrete Society, London, - 1978
- ELETROBRÁS; CBDB - “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas” – Rio de Janeiro-2003
- FLEURY, S.V.; CASTRO, C. H.; BITTENCOURT, R. M.; GRAÇA, N. G.; LIMA, F. O. – “Avaliação do Cisalhamento do Concreto Compactado com Rolo” - 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis - 2004
- FORBES, B. A. - "The Development and Testing of Roller-Compacted Concrete for Dams in Australia" - Transactions, Sixteenth Congress on Large Dams, San Francisco -1988

FORBES, B.; YANG, L.; TANG, G.; YANG, K. – “Jiangya Dam, China Some Interesting Techniques Developed for High Quality RCC Construction” - International Symposium on Roller Compacted Concrete Dam, China - 1999

FRANCO, F. R.; AITA, C. A.; ARAUJO, T. A.; LIMA, G. A. R.; CESCO, R. J. - “Barragem de Val de Serra - Aspectos de Construção” - III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Foz do Iguaçu, 1998

FRANCO, F. R.; KRUM, S. M.; ARAÚJO, T. A.; PICADA R. F.; ULLOA, A. D. C.; DZIDRICKI, P. T. - “Barragem Val de Serra - Aspectos de Projeto” - III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Foz do Iguaçu, 1998b

FRANKLIN, J. A.; DUSSEAULT, M. B. – “Rock Engineering” - McGraw Hill, New York - 1989

FUSCO, P. B. – “Estruturas de Concreto – Fundamentos do Projeto Estrutural” – Editora da Universidade de São Paulo e Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., São Paulo - 1976

GALLEGO, A. R.; GONÇALVES JUNIOR, J.; ANDRADE, M. A. S.; GÓZ, R. S.; BITTENCOURT, R. M.; PACELLI DE ANDRADE, W. - “Equipamento para Produção de Pista Experimental de Concreto Compactado com Rolo em Laboratório” - IBRACON-1999

GALLEGO, A.; GONÇALVES JR, J.; ANDRADE, M. A. S.; GÓZ, R. S.; BITTENCOURT, R. M.; PACELLI DE ANDRADE, W. - “Equipamentos para Executar Pista Experimental de Concreto Compactado Com Rolo em Laboratório” - III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Foz do Iguaçu, 1998

GENTILE, G. - "Notes on the Construction of the Alpe Gera Dam” - Rapid Construction of Concrete Dams - Proceedings, Engineering Foundation Research Conference, Pacific Grove. California: ASCE-1970

GENTILE, G. - "Study, Preparation and Placement of Low Cement Concrete with Special Regards to Its Use in Solid Gravity Dams" - Transactions, Eighth International Congress on Large Dams, Edinburgh - 1964

GERINGER, J.- "Special Conference -The Design and Construction of RCC Dams in Southern Africa" - International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams., Santander, Spain - 1995a

GERINGER, J. J. - "The Design and Construction of the Groutable Crack Joints of Wolwedans Dam" - International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain-1995

GEYER, A. L. B., GEYER, R. M. T., RECENA, F. A. P. – “Permeabilidade do Concreto como um dos Principais Fatores Determinantes da Durabilidade dos Reservatórios de Água” – 36^a Congresso Brasileiro do Concreto, Porto Alegre - 1994

GOLIK, M. A.; ANDRIOLO, F. R. - "Desempenho da Membrana de PVC da Barragem de Urugua-I" - XX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Curitiba, Brasil -1992

GRAÇA, N. G.; BATISTA, E. L.; ALBUQUERQUE, A. C.; ANDRADE, M. A. S.; BITTENCOURT, R. M.; ANDRADE, W. P. – “New Trends of Construction Methodology and its Influence in the Research for Brazilian Roller Compacted Concrete (RCC)” – Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete, Madrid, Spain – 2003

GRAÇA, N. G.; BATISTA, E. L.; R. M.; ANDRADE, W. P. – “Brazilian Experience of Roller Compacted Concrete (RCC)” – Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete, Madrid, Spain – 2003b

GRAÇA, N. G.; MENDES, H. S.; BATISTA, E. L.; BORGES, V. E. S.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. – “A Influência do Grau de Compactação nas Propriedades do Concreto Compactado com Rolo” – 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis - 2004

GRISHIN, M. M. – “Hydraulic Structures”, Mir Publishers – 1982

GUERRA, E. A.; FONTOURA, J. T. F.; MONTEIRO, P. J. M.; BITTENCOURT, R. M.; PACELLI DE ANDRADE, W. – “Um Método de Dosagem para Concreto Massa Baseado no Módulo de Finura e na Graduação Geométrica” – Seminário sobre Tecnologia e Dosagem do Concreto, Goiânia - 1996

HADLEY, H.M.-"Discussion: Masonry Dams - A Symposium"-Transactions. New York: ASCE-1941

HANSEN, K. D.; McLEAN, F. G.; FORBES, B. A. – “Shear Strength of Roller Compacted Concrete Dams -International Symposium on Roller Compacted Concrete Dam, China – 1999

HANSEN, K. D.; REINHARDT, W. C. - "Roller Compacted Concrete Dams" - McGraw-Hill, New York - 1991

HELENE, P. E TERZIAN, P. – “Manual de Dosagem e Controle do Concreto” – Editora Pini Ltda., São Paulo – 1993

HESS, J. R. – “RCC Lift Joint Strength – Corps of Engineers Practice”, International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, China, 1999

HIROSE, T. - "Research and Practice Concerning RCD Method" - Transactions, Fourteenth International Congress on Large Dams, Rio de Janeiro - 1982

HOLANDA, F. G. - “Willow Creek - Primeira Barragem de Gravidade Projetada e Construída em Concreto Rolado” - Colóquio Sobre Concreto Massa-1983

HOPMAN, D. R. and CHAMBERS, D. R. -"Construction of Elk Creek Dam",-Roller Compacted Concrete II. Proceedings of the RCC Specialty Conference San Diego, California, ASCE, New York, -1988

HOPMAN, R. D. - "Lessons Learned from Elk Creek Dam" - Roller Compacted Concrete II, Proceedings of the RCC Specialty Conference San Diego, California, ASCE. New York - 1992

IBRACON INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO – “Trabalho do Sub-Comitê Projeto de Obras de Concreto Massa” – Comitê Técnico de Concreto Massa – CT 204, São Paulo – 1986

IBRACON INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO – “Trabalho do Sub-Comitê 3 - Projeto de Obras de Concreto Massa” – Comitê Técnico de Concreto Massa – CT 204, São Paulo - 1989

ICOLD - "State-of-the-Art of Roller-Compacted Concrete Dams" - ICOLD-International Commission on Large Dams, Committee on Concrete Dams-1997

ICOLD – “Dam Failures Statistical Analysis” – Bulletin 99 of the International Commission on Large Dams, Paris. – 1995

ICOLD – “Dam Failures Statistical Analysis” – Bulletin 99 of the International Commission on Large Dams, Paris - 1995

ICOLD, International Commission on Large Dams – “World Register of Dams 2003” – <http://www.icold-cigb.org/registre>, acessado em 04 de Janeiro de 2005.

ICOLD-CIGB – “Concrete Dams – Control and Treatment of Cracks” – Bulletin 107 of the International Commission on Large Dams, Paris - 1997

IFFLA, J. A.; MILLMORE, J. P. and DUNSTAN, M. R. H. - "The Use of RCC for Small Flood Alleviation Dams in the UK" - International Water Power & Dam Construction, United Kingdom - 1992

IWPDC- INTERNATIONAL WATER POWER & DAM CONSTRUCTION - "World News: Construction of Elk Creek RCC Dam H IWPDC- INTERNATIONAL WATER POWER & DAM CONSTRUCTION - "World News: construction of Elk Creek RCC dam halted",- International Water Power & Dam Construction. United Kingdom, -1988

JIANG, C.; DU, Z.; YANG L.; YANG, K. – “The Horizontally Advancing Sloped Layer Construction of RCC” - International Symposium on Roller Compacted Concrete Dam, China - 1999

JNCOLD - JAPANESE NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS. –“Dams in Japan” - Japan, 1982

JOHNSON, H. A., and CHAO, P. C.- "Rollcrete Usage at Tarbela Dam" - Concrete International, ACI, Detroit, Michigan, -1979

KAMEL, K. F. S.; BABA, L. J. N.; XAVIER, L. V.; AVILA, C. M. - "Estudos de Seleção da Barragem de CCR para Salto Caxias" - II Simpósio Nacional de Concreto Compactado a Rolo, Curitiba, Brasil - 1996

KAMEL, K. S. F.; BABÁ, L. J. N.; BLINDER, S.; RAUEN, J. - "Selection Studies for Salto Caxias RCC dam" - International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain-1995

KARL, R. W. - "Upper Stillwater Dam Construction Program" - Roller Compacted Concrete, Proceedings of the Symposium at the ASCE Convention, Denver - 1985

KOGAN, E. A.; FEDOSSOV, V. E. - "Roller Compacted Concrete and Horizontal Construction Joints Strength" - International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain - 1995

KOKUBU, M. - "Development in Japan of Concrete Dam Construction by the RCD Method" - Engineering for Dams, Japan Dam Engineering Center, Special Issue. Tokyo, -1985

KREMPEL, A. F; PEREIRA, M. A. C.. - "Barragem de CCR Usina Hidrelétrica de Salto Caxias" - XXI Seminário Nacional de Grandes Barragens. Rio de Janeiro, Brasil-1997

KUPERMAN, Selmo Chapira. -"Barragens Brasileiras de Concreto Compactado com Rolo: Passado. Presente e Futuro", - II Simpósio Nacional de Concreto Compactado a Rolo, Curitiba, Brazil, - 1996

LEVIS, P.; MAGNAVACA, R.; MUSSI, J. M.; KAMEL, K. F. S.; BABÁ, L. J. N. - "Esquema de Desvio do Rio Iguaçu da Usina de Salto Caxias e Ocorrência de Galgamentos Programados da Barragem" - III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Foz do Iguaçu - 1998

LOWE, J. III - "Discussion: Utilization of Soil-Cement as Slope Protection for Earth Dams" – First ASCE Water Resources Engineering Conference, Omaha, Nebraska-1962

MACHADO, R.; REZENDE, P. F. V. S.; AMARO, P. R.; KUPERMAN, S. C. - "Relação de Projetos de Barragens Brasileiras de Concreto Compactado Com Rolo",-I Simpósio de Obras em Concreto Compactado Com Rolo, São Paulo, - 1995

MARQUES FILHO J.; PACELLI DE ANDRADE, W.; STEFFEN, R. D.; MARINO, M. A.; LEVIS, P. - "Execução de Aterros Experimentais de CCR em Laboratório, Programa de Ensaio" - III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Foz do Iguaçu, 1998

MARQUES FILHO, J.; MARINO, M. A., LEVIS, P.; KRUGER, D. A. V. - "Jordan River Diversion Design" - International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Santander, Spain - 1995

MARQUES FILHO, J.; MARINO, M. A.; GABINIO, A. S. G.; KIDO, A. T. - "Parâmetros Necessários ao Projeto de Barragens de CCR - Barragem de Derivação do Jordão como Exemplo" - II Simpósio Nacional de Concreto Compactado a Rolo. Curitiba, Brasil, -1996

MARQUES FILHO, J.; STEFFEN, R. D.-"Salto Caxias Strength Parameter in Layers Contact for RCC Dams"-99 International Conference on Dam Safety and Monitoring, China - 1999

MARSHALL, T.- "Tarbela Rescue: 380,000 m3 Plug Beats the Flood" - New Civil Engineer, Institution of Civil Engineers, London - 1975

MASON, J. – "Estruturas de Aproveitamentos Hidrelétricos", - Editora Campus Ltda., Rio de Janeiro - 1988

MATSUMURA, G. M.; SCHRADER, E. K.; MCKINNON, R.- "Discussion: Construction of Willow Creek Dam" - Concrete International, ACI. Detroit-1985

MCDOWELL, T. E. - "Grouting of Willow Creek Dam and Foundation" - USCOLD Newsletter nº78, Boston - 1985

MCTAVISH, R. F. - "Construction of Upper Stillwater Dam" - Roller Compacted Concrete II, Proceedings of the RCC Specialty Conference San Diego, California, ASCE, New York - 1988

MEHTA, K.; MONTEIRO, P. J. M. -"Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais"-Editora PINI, São Paulo, Brasil, 1994

MOFFAT, A. I. B. -"A study of Dry Lean Concrete Applied to the Construction of Gravity Dams" - Transactions, Eleventh International Congress on Large Dams, Madrid-1973

- MOFFAT, A. I. B.- "Discussion: New ideas for more rapid and economic construction of concrete dams" - Transactions, Eleventh International Congress on Large Dams, Madrid-1973b
- MOSER, D. E.; MUSSI, J. M. P.; ANDRIOLO, F. R. -"O Uso de Aditivo Plastificante e Retardador de Pega No CCR - Propriedades e Benefícios" - III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Foz do Iguaçu, - 1998
- MOSER, D. E.; STEFFEN, R. D.; ANDRIOLO, F. R. – “Additives in RCC – Research and a Real Case” - Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain - 2003a
- MOSER, D. E.; STEFFEN, R. D.; BRITTO, C.; MUSSI, J. M. P. – “Quality Control RCC of Dona Francisca Dam-” - Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain-2003
- NAGAYAMA, I; JIKAN, S. – “30 Years’ History of Roller-Compacted Concrete Dams in Japan” - Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain - 2003
- NBR 6118 – “Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo - 2003
- NETTO, F. F.; BETIOLI, I.; DUARTE, J. D. C.; ROSÁRIO, L. C.; BRAGA, J. A.; SA, S. N.; MISAEL, S. A.; ANDRIOLO, F. R. -"Aplicação, Ensaios e Pesquisas do Concreto Compactado a Rolo na Itaipu Binacional", - I Simpósio de Obras em Concreto Compactado Com Rolo, São Paulo – 1995
- NEVILLE, A. M. - "Propriedades do Concreto" - Editora PINI, São Paulo, Brasil - 1982
- OLIVARES, J. L.; NAVARRO, J. F.; AUSÍN, V. – “Development of a Direct Tensile Strength Test Procedure for Roller Compacted Concrete Characterization” - Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain - 2003
- OLIVERSON, J. E.; A. T. RICHARDSON - "Upper Stillwater Dam: Design and Construction Concepts" - Concrete International, ACI. Detroit-1984
- PACELLI DE ANDRADE, P.; ANDRIOLO, F. R. - "Barragens em CCR Sistemas de Impermeabilização: Discussões, Sugestões e Uso" - II Simpósio Nacional de Concreto Compactado a Rolo. Curitiba, Brasil - 1996
- PACELLI DE ANDRADE, W. – “Relato do Tema V – Pesquisas e Perspectivas de Futuro envolvendo CCR” – II Seminário de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba - 1996
- PACELLI DE ANDRADE, W. (editor). -"Concretos - Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo - Ensaios e Propriedades" - Equipe de FURNAS -Laboratório de Concreto, -1997
- PACELLI DE ANDRADE, W.; ANDRIOLO, F. R. - “Dosagem do CCR: Alta Pasta?; RCD?: Pobre? Ou Adequado Teor de Finos“-III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba - 1998

PACELLI DE ANDRADE, W.; ANDRIOLO, F. R.; SARKARIA, G. S. - "Treatment and Performance of Construction Joints in Concrete Dams" - Water Power & Dam Construction – November - 1993

PAULON, V. A. – “O Fenômeno Térmico no Concreto” – Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo - 1987

PAULON, V. A.; KREMPEL, A. F.; CREVILARO, C. C.- “Adição de Pó ao Concreto como Fator Econômico e de Durabilidade” -34ª Reunião do IBRACON, Curitiba-1992.

PIMENTEL, A. C.; VASCONCELOS, G. R. L.; GAMA, H. R.; SILVEIRA, J. A. -"Utilização de Concreto Rolado na Usina Hidrelétrica Tucuruí” - XVI Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belo Horizonte, - 1985

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION – “Concrete Information” – Skokie, USA – 1987

PROJECT NATIONAL BACARA- 1988/1996 - "Roller Compacted Concrete - RCC Dams" - Presses de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.-1997

QIU, M. Y. – “Stability Analysis of RCC Gravity Dam Blocks on Sloped Banks in Mianhuatan Hydropower Station” - Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain - 2003

RAPHAEL, J. M.- "The Optimum Gravity Dam" - Rapid Construction of Concrete Dams - Proceedings, Engineering Foundation Research Conference, Pacific Grove. California: ASCE-1970

RIBEIRO, A. B. – “Betão Compactado com Cilindros. Composição e Características.”- Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. – 1998

RIBEIRO, A. B., CARRAJOLA, A. – “Characterization of Fresh Concrete in order to Evaluate the Joints Between Layers” – Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete, Madrid, Spain – 2003

RIBEIRO, A. B.; DIÉZ-CASCÓN, J.; GONÇALVES, A. – “A Roller Compacted Concrete – Tensile Strength of Horizontal Joints” – Materials and Structures, Vol.34, August-September - 2001

RIBEIRO, A. B.; SANTANA, T.; SILVA GOMES, A. – “The Influence of Consistency of RCC in the Quality of the Joints between Layers” – International Conference on RCC Dam Construction in Middle East”, Irbid, Jordan – 2002

RIBEIRO, C.; NOGUEIRA, J. R. G.; MARINO, M. A. - “Estudos Comparativos de Resistência a Tração do CCR: Tração Direta X Tração por Compressão Diametral” - III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Foz do Iguaçu - 1998

RICHARDSON, A. T. - "Performance of Upper Stillwater Dam" - Roller Compacted Concrete II, Proceedings of the RCC Specialty Conference San Diego, California,ASCE. New York, - 1992

RICHARDSON, A. T. - "Performance of Upper Stillwater Dam" - Symposium on RCC Dam Sponsored by the Chinese Society of Hydroelectric Engineering, Beijing, China -1991

- RICHARDSON, A. T. -"Upper Stillwater Dam - Design, Construction and Performance" – US Army Corps of Engineers Structural Conference, St Louis, Missouri, -1988
- RILEM – “Direct Tension of Concrete Specimen” - Materials and Structures, Vol1, No.35, RILEM TC14 - CPC, 1975.
- RODRIGUES, P. P. F. – “Parâmetros de Dosagem do Concreto” - Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, Brasil - 1984
- SAKS, N. C. O. – “Risks with Floods During the Construction of the Salto Caxias Hydroelectric Power Plant”- 99 International Conference on Dam Safety and Monitoring, China - 1999
- SANTANA, H.; CASTELL, E – “RCC Record Breaker”, Water Power and Dam Construction, Wilmington Publishing Ltd., United Kingdom - 2004
- SANTANA, H.; CASTELL, E. – “Miel I: RCC Dam, Height Word Record” - Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain - 2003
- SANTOS, S. B.; EDUARDO DE AQUINO GAMBALE, E. A.; N GAMA, J. L. C. N.; - “Programa de Análise Termomecânica em Estruturas de Concreto Massa Durante a Fase de Construção” – 97º Seminário Nacional de Grandes Barragens, Goiânia - 2005
- SARKARIA, G. S.; ANDRIOLO, F. R. - "Special Factors in Design of High RCC Gravity Dams" - International Water Power & Dam Construction –April - 1995
- SCHRADER, E. – “Seepage, Permeability, and Upstream Facing for Roller Compacted Concrete (RCC) Dams” – Second CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Supplementary Papers, Nevada, USA, 1995.
- SCHRADER, E. K. - "The First Concrete Gravity Dam Designed and Built for Roller-Compacted Construction Methods",-Concrete International, ACI, Detroit - 1982
- SCHRADER, E. K. - "Willow Creek Dam - An Optimum Gravity RCC Dam with Vertical Upstream Face" - Rolled Concrete for Dams, Proceedings of the International CIRIA Conference. London, -1981
- SCHRADER, E. K. -"Roller-Compacted Concrete",-The Military Engineer, The Society of Military Engineers. Washington, D. C., vol. 69 (451), - 1977
- SCHRADER, E. K., and MCKINNON. R. - "Construction of Willow Creek Dam" - Concrete International, ACI, Detroit - 1984
- SCHRADER, E. K.; MCKINNON, R. - "Construction of Willow Creek Dam" - Concrete International, ACI, Detroit-1984
- SCHRADER, E. K.; THAYER, H. J.- "Willow Creek Dam A Roller Compacted Concrete Fill" - Transactions, Fourteenth International Congress on Large Dams, Rio de Janeiro -1982
- SCHREIBER, G. P. – “Usinas Hidrelétricas”, Editora Edgar Blücher Ltda., São Paulo - 1981
- SCUERO, A. M.; GONTIJO, M. - “Emprego de Membrana Impermeável na Face de Montante - Medida para Simplificar Projeto e Construção e Reduzir Custos de Barragens de CCR“ - III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba - 1998

- SEMBENELLI, P. and SHENGPEI, W. – “Chinese Experience in the Design and Construction of RCC Arch Dams” – The International Journal on Hydropower & Dams – 1998
- SERAFIM, J. L. – “A Subpressão nas Barragens” – Ministério de Obras Públicas, Publicação 55 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa - 1954
- SHARMA, H.D. – “Concrete Dams”, Metropolitan Book Co. Pvt. Ltd., New Delhi, 1981
- SHAW, Q. H.W. – “The Development of RCC Arch Dams”- Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain - 2003
- SIVLEY, W. F. - "Discussions: Zintel Canyon Optimum Gravity Dam",-Transactions, Twelfth Congress on Large Dams, Mexico City-1976
- SOBRAL, E. S. – “Dosagem Experimental de Concretos” - Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, Brasil – 1980
- TAKAHI, K. – “History and Current Situation of RCD Construction Method in Japan” - International Symposium on Roller Compacted Concrete Dam, China-1999
- TUCKER, G. - "Elk Creek Dam: Roller-Compacted Concrete Mixing and Placing Study Report to Corps of Engineers" - Tucker Associates Inc., Portland District,-1984
- TYNES, W. O.- "Feasibility Study of No-Slump Concrete for Mass Concrete Construction" - Miscellaneous Paper C-73-10. Vicksburg, Mississippi: US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, - 1973
- ULHOA, A. D.; DORN, A. A.; CARMO, J. B. M.; FARIA, R. A. S.; AZAMBUJA, R.; PICADA, R. F.; PERGHER, R.; FRIMM, R. L.; APPEL, S.; PACELLI DE ANDRADE, W. - “Detalhes de Projeto e Adequação de Equipamentos para Produção de CCR - Barragem de Bertarello Bento Gonçalves – RS” III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Foz do Iguaçu, 1998
- USBR - "Design Criteria for Concrete Arch and Gravity Dams" - US Bureau of Reclamation Engineering Monograph. Denver - 1974
- USBR – “Concrete Manual” – A Water Resources Technical Publication of the Bureau of Reclamation of the U. S. Department of the Interior, Washington -, 1975
- VARLET, H. –“Presas de Embalse” - Editorial Interciencia, Madrid – 1972
- VICARI, L. F.; SILVA, N. A.; SILVEIRA, R. L.; BITTENCOURT, R M; PACELLI DE ANDRADE, W - “Estudos de Concreto Compactado Com Rolo Com Alto Teor de Finos”-III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba -1998
- WANG, S. - "Kengkou Roller Compacted Concrete Dam" - Transactions, Sixteenth Congress on Large Dams, San Francisco - 1988