

DOUGLAS EMERSON MOSER

**MEDIDAS MÚLTIPLAS DE CARACTERÍSTICAS DE BARRAGENS DE
CONCRETO COMPACTADO COM ROLO UTILIZANDO
INSTRUMENTAÇÃO POR FIBRA ÓTICA**

**Dissertação apresentada como requisito
parcial à obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil, Programa de Pós-
Graduação em Construção Civil, Setor
de Tecnologia, Universidade Federal do
Paraná.**

**Orientador: Prof. Dr. José Marques
Filho**

CURITIBA

2006

**Ao Deus Pai por Nosso Senhor Jesus
Cristo em ação de graças pela Mãe
Rainha Três Vezes Admirável de
Schoenstatt e pelo presente de Deus que
são minha esposa Vivian e meus filhos
Mathias e Maura**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus Trino, origem, meio e fim de tudo e que abriu todas as portas e providencialmente conduziu todas as etapas que possibilitaram este trabalho. À Nossa Senhora, sob o título de Mãe Rainha Três Vezes Admirável de Schoenstatt, pela sua constante intercessão.

Agradeço com todo amor a minha esposa Vivian e meus filhos Mathias e Maura, primeiramente por serem para mim um presente de Deus, fonte de minha inspiração e motivo de meu trabalho e segundo por todo apoio que sempre me deram, combinando todos os sentimentos bons que Deus inseriu no ser humano e que durante todo este período, muitas vezes difícil, do desenrolar deste trabalho, sempre me animaram e me impulsionaram a seguir em frente e confiar na Providência Divina.

Aos meus pais Norival e Noeli e meus sogros João Haroldo e Maria Lucia por me animarem no sentido de atingir a meta deste trabalho. Na pessoa destes gostaria de agradecer a todos os familiares que me incentivaram.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Marques Filho que sempre confiou no meu trabalho e a todos do PPGCC/UFPR que me apoiaram.

Ao Eng. Marcos Alberto Soares, com que divido a origem e condução da idéia do projeto, e demais amigos da COPEL que nos apoiaram em seu desenvolvimento.

Ao Prof. Paulo Chamecki pelo apoio constante, ao Técnico Amauri de Jesus Garcia, peça chave na instalação e leitura dos instrumentos, e a todos do LACTEC que ajudaram direta e indiretamente.

Ao Prof. Dr. Markus Aufleger, ao Eng. Roland Hoepffner e a todos da Universidade Técnica de Munique, TUM, pela parceria e contribuição decisiva para o trabalho.

Ao Prof. Guedes, Eduardo e a todos da GAVEA SENSOR e FIBER SENSING pelos esforços de parceria na condução do trabalho.

“Confio em teu poder, em tua bondade.

Em ti confio com filialidade.

Confio, cego, em toda situação.

Mãe, no teu filho e em tua proteção.”

Padre José Kentenich

SUMÁRIO

LISTAS DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO DA PESQUISA	1
1.2 HIPÓTESE.....	1
1.3 JUSTIFICATIVAS.....	2
1.3.1 Justificativa Tecnológica.....	2
1.3.2 Justificativa Econômica.....	4
1.3.3 Justificativa Social.....	5
1.3.4 Justificativa Ambiental.....	5
1.4 MÉTODO DE PESQUISA.....	6
1.4.1 Critério de Seleção de Estudo de Caso.....	7
1.4.2 Protocolo de Coleta de Dados.....	7
1.4.3 Unidade de Análise.....	7
1.4.4 Validação Interna.....	8
1.4.5 Validação Externa.....	8
1.5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	8
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	9
2 INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS DE CCR UTILIZANDO FIBRA ÓTICA	10
2.1 BARRAGENS DE CCR.....	10
2.1.1 Aspectos Históricos	10
2.1.2 Histórico da Instrumentação de Barragens de Concreto no Brasil	14
2.1.3 Objetivos Básicos da Instrumentação de Barragens	15
2.1.4 Principais Instrumentos Utilizados em Barragens de Concreto.....	17
2.1.4.1 Instrumentos instalados na estrutura da barragem de concreto.....	17
2.1.4.2 Instrumentos instalados na fundação da barragem.....	18
2.1.4.3 Escolha dos instrumentos a serem instalados em barragens de concreto.....	18
2.1.5 Principais Tipos de Sistemas de Medição para Instrumentação de Barragens Disponíveis Atualmente.....	21

2.1.5.1	Sistema de instrumentação por princípio elétrico.....	22
2.1.5.2	Sistema de instrumentação por princípio de corda vibrante	23
2.1.5.3	Sistema de instrumentação utilizando fibra ótica	24
2.2	INSTRUMENTAÇÃO POR FIBRA ÓTICA.....	25
2.2.1	Classificação dos Sensores de Fibra Ótica	25
2.2.1.1	Classificação dos sensores de fibra ótica segundo o princípio de medição.....	25
2.2.1.1.1	Sensores intrínsecos	26
2.2.1.1.2	Sensores extrínsecos.....	26
2.2.1.2	Classificação dos sensores de fibra ótica segundo a aplicação.....	26
2.2.1.2.1	Sensores localizados	26
2.2.1.2.2	Sensores multiplexados	26
2.2.1.2.3	Sensores distribuídos	27
2.2.1.3	Classificação dos sensores de fibra ótica segundo a transdução.....	27
2.2.1.3.1	Sensores tipo intensidade	27
2.2.1.3.2	Sensores Espectrométricos.....	27
2.2.1.3.3	Sensores tipo fase.....	27
2.2.1.4	Sensores especiais	28
2.2.2	Principais Tipos de Sensores de Fibra Ótica Utilizados em Instrumentação de Estruturas Civis de Concreto	29
2.2.2.1	Sensores de fibra ótica extrínsecos localizados interferométricos de Fabry-Perot.....	30
2.2.2.1.1	Princípio de funcionamento dos sensores Fabry Perot.....	30
2.2.2.1.2	Aplicação de sensores Fabry Perot em instrumentação de barragens	30
2.2.2.2	Sensores de fibra ótica intrínsecos localizados espectrométricos utilizando redes de Bragg.....	31
2.2.2.2.1	Princípio de funcionamento dos sensores Redes de Bragg.....	31
2.2.2.2.2	Aplicação de sensores Redes de Bragg em instrumentação de barragens	32
2.2.2.3	Sensores de fibra ótica intrínsecos distribuídos de amplitude para medição de deformação pelo método Brillouin	33
2.2.2.3.1	Princípio de funcionamento dos sensores distribuídos Brillouin	33
2.2.2.3.2	Aplicação de sensores distribuídos Brillouin em instrumentação de barragens.....	34
2.2.2.4	Sensores de fibra ótica intrínsecos distribuídos de amplitude para medição de temperatura e percolação pelo método Raman.....	35
2.2.2.4.1	Princípio de funcionamento dos sensores distribuídos Raman	35
2.2.2.4.2	Aplicação de sensores distribuídos Raman em instrumentação de estruturas civis	38
2.3	APLICAÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO POR FIBRA ÓTICA EM BARRAGENS DE CCR	39
2.3.1	Barragem em Arco Shimenzhi, China.....	39
2.3.2	Barragem à Gravidade Wala, Jordânia	42

2.3.3	Barragem à Gravidade Mujib, na Jordânia	44
2.4	PRINCIPAIS DADOS LEVANTADOS.....	45
3	MÉTODO DE PESQUISA	48
3.1	ESCOLHA DO MÉTODO.....	48
3.1.1	Método do Experimento	49
3.1.2	Método da <i>Survey</i>	49
3.1.3	Método do Estudo de Caso.....	49
3.2	PLANEJAMENTO DO ESTUDO DE CASO.....	49
3.2.1	Escolha da Barragem Protótipo.....	49
3.2.2	Escolha da Unidade de Análise	52
3.2.3	Escolha dos Instrumentos e Parceiros	52
3.2.3.1	Termômetros de corda vibrantes convencionais (TCVC).....	53
3.2.3.2	Termômetros de fibra ótica método Redes de Bragg (TFOB).....	54
3.2.3.3	Termômetros de fibra ótica método distribuído Raman (TFOR).....	55
3.2.4	Estudo Prévio em Laboratório para Treinamento da Equipe e Ajustes.....	57
3.2.4.1	Testes prévios de preparação para a instalação de instrumentação por fibra ótica pelo método redes de Bragg - TFOB.....	58
3.2.4.2	Testes prévios de preparação para instalação de instrumentação por fibra ótica pelo método distribuído Raman.....	60
3.2.5	Projeto da Aplicação da Instrumentação no Protótipo	63
3.2.5.1	Projeto de instalação dos sensores TCVC	65
3.2.5.2	Projeto de instalação dos sensores TFOB e EFOB.....	66
3.2.5.3	Projeto de instalação dos sensores TFOR.....	68
3.3	PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS.....	70
3.4	ESCOLHA DO MÉTODO DE ANÁLISE	71
3.5	ESCOLHA DO MÉTODO DE VALIDAÇÃO	71
4	RESULTADOS E ANÁLISE.....	73
4.1	PREPARAÇÃO PARA O ESTUDO DE CASO	73
4.1.1	Preparação para a Instalação de Instrumentação por Fibra Ótica pelo Método de Redes de Bragg.....	73
4.1.2	Preparação para Instalação de Instrumentação por Fibra Ótica pelo Método Distribuído Raman	76
4.2	ESTUDO DE CASO.....	79
4.2.1	Resultados de Medição da Temperatura Ambiente	79
4.2.2	Resultados Obtidos das Leituras dos Instrumentos	79
4.2.2.1	Termômetros TCVC	79
4.2.2.2	Termômetros TFOB.....	84

4.2.2.3	Termômetros TFOR.....	85
4.2.3	Análise.....	93
4.2.3.1	Comparação TFOB X TCVC.....	93
4.2.3.1.1	Comparação das leituras	93
4.2.3.1.2	Comparação da observação direta de campo	94
4.2.3.1.3	Comparação de custos	96
4.2.3.2	Comparação TFOR x TCVC.....	98
4.2.3.2.1	Comparação das leituras	98
4.2.3.2.2	Comparação da observação direta de campo	100
4.2.3.2.3	Comparação de custos	102
4.2.4	Validação Interna.....	103
4.2.5	Validação Externa.....	104
5	CONCLUSÃO.....	105
5.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DE PESQUISA ADOTADO	105
5.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS SENSORES DE FIBRA ÓTICA TESTADOS.....	105
5.2.1	Sobre os Sensores TFOB.....	105
5.2.2	Sobre os Sensores TFOR.....	106
5.3	CONCLUSÕES GERAIS SOBRE SENSORES DE FIBRA ÓTICA.....	107
5.4	CONCLUSÃO FINAL	108
5.5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
	ANEXO 01 – INFORMAÇÕES ADICIONAIS	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MISTURA UTILIZADA NO TESTE TFOB.....	58
TABELA 2 - MISTURA UTILIZADA NO TESTE TFOR.....	61
TABELA 3 - MISTURA UTILIZADA NA BARRAGEM DE UHE FUNDÃO ABAIXO DA COTA 670,00M	64
TABELA 4 - MISTURA UTILIZADA NA BARRAGEM DE UHE FUNDÃO ACIMA DA COTA 670,00M	64

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA DE LANÇAMENTO DE CCR EM BARRAGENS (MARQUES FILHO, 2005).....	13
FIGURA 2 - SEÇÃO ESQUEMÁTICA TÍPICA DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO (MARQUES FILHO, 2005).....	19
FIGURA 3 - ESQUEMA DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DISTRIBUÍDO PARA DETECTAR PERCOLAÇÃO E TEMPERATURA (AUFLEGER ET.AL, 2005).....	37
FIGURA 4 - PLANTA E VISTA GERAL DA BARRAGEM DE UHE FUNDÃO - (FONTE: CADERNOS DE DESENHOS, PROJETISTA INTERTECHNE).....	51
FIGURA 5 - VISTA GERAL DA BARRAGEM DURANTE A CONSTRUÇÃO.....	52
FIGURA 6 - TERMÔMETRO CONVENCIONAL DE CORDA VIBRANTE – TCVC, APLICADO AO LADO DO CABO TFOR.....	53
FIGURA 7 - TERMÔMETRO DE FIBRA ÓTICA UTILIZANDO REDES DE BRAGG-TFOB, APLICADO AO LADO DO CABO TFOR.....	54
FIGURA 8 - DETALHE EM CORTE DO CABO DE FIBRA ÓTICA TFOR UTILIZADO.....	56
FIGURA 9 - TERMÔMETRO DE FIBRA ÓTICA PELO MÉTODO DISTRIBUÍDO TIPO RAMAN - TFOR, CABO PRETO ADQUIRIDO EM BOBINAS.....	56
FIGURA 10 – CROQUI EM PLANTA DA ÁREA DE TESTES - TFOB.....	59
FIGURA 11 - PLANTA DO BLOCO DE TESTES TFOB - SEÇÃO NA METADE DA ALTURA DO BLOCO.....	60
FIGURA 12 - CORTE DO BLOCO DE TESTES TFOB - SEÇÃO NA METADE DA LARGURA DO BLOCO.....	60
FIGURA 13 - CROQUI EM PLANTA DA ÁREA DE TESTES - TFOR.....	62
FIGURA 14 - PLANTA DO BLOCO DE TESTES – TFOR, CAMADA INFERIOR.....	62
FIGURA 15 - PLANTA DO BLOCO DE TESTES – TFOR, CAMADA SUPERIOR.....	63
FIGURA 16 - CORTE DO BLOCO DE TESTES – TFOR, SEÇÃO NA METADE DA LARGURA.....	63
FIGURA 17 - DETALHE TÍPICO DOS LOCAIS EM QUE A TEMPERATURA FOI MEDIDA SIMULTANEAMENTE PELOS TRÊS TIPOS DE SENSORES ESTUDADOS :TCVC, TFOB E TFOR.....	64
FIGURA 18 - SEÇÃO INSTRUMENTADA DO BLOCO B11 UHE FUNDÃO – ALOCAÇÃO DOS SENSORES TCVC.....	66
FIGURA 19 - SEÇÃO INSTRUMENTADA DO BLOCO B11, UHE FUNDÃO – ALOCAÇÃO DOS SENSORES TFOB E EFOB.....	67
FIGURA 20 - CROQUI EM PLANTA DA INSTALAÇÃO DO TFOB E EFOB EL 690,00.....	68
FIGURA 21 - SEÇÃO INSTRUMENTADA DO BLOCO B11, UHE FUNDÃO, ALOCAÇÃO DOS SENSORES TFOR.....	69
FIGURA 22 - CROQUI EM PLANTA DA SEÇÃO TIPO DE INSTALAÇÃO DO TFOR.....	70
FIGURA 23 - VISÃO GERAL DA ÁREA DE TESTES - TFOB.....	73
FIGURA 24 - DETALHE DA COBERTURA DOS INSTRUMENTOS INSTALADOS – TESTE TFOB.....	73
FIGURA 25 - RESULTADOS DE LEITURA DOS SENSORES TFOB T2 E TELC.....	74
FIGURA 26 - COMPARAÇÃO TFOB T1, TFOB T2 E TFOB T3.....	75
FIGURA 27 - VISÃO GERAL DA ÁREA DE TESTES - TFOR.....	76

FIGURA 28 - DETALHE DA COLOCAÇÃO DOS CABOS NA CAMADA INFERIOR, BLOCO DE TESTES TFOR.....	76
FIGURA 29 - DETALHE DA COLOCAÇÃO DOS CABOS NA CAMADA SUPERIOR, BLOCO DE TESTES TFOR.....	77
FIGURA 30 - DETALHE DO MÉTODO DE COMPACTAÇÃO DO CCR, BLOCO DE TESTES TFOR.....	77
FIGURA 31 - VISÃO GERAL DO BLOCO DE TESTES TFOR DEPOIS DE CONCLUÍDO.....	77
FIGURA 32 - RESULTADOS OBTIDOS BLOCO DE TESTES TFOR	78
FIGURA 33 - TEMPERATURA AMBIENTE– CANTEIRO DE OBRAS UHE FUNDÃO.....	79
FIGURA 34 - COLOCAÇÃO DE FORMA DE BLOCKOUT ANTERIORMENTE À PASSAGEM DO ROLO - TCVC	80
FIGURA 35 - COMPACTAÇÃO DA REGIÃO A SER INSTRUMENTADA - TCVC	80
FIGURA 36 - RETIRADA DE FORMA DE BLOCKOUT APÓS A PASSAGEM DO ROLO - TCVC.....	80
FIGURA 37 - ACABAMENTOS NOS LOCAIS ONDE SERÃO COLOCADOS OS SENSORES TCVC	81
FIGURA 38 - COLOCAÇÃO DE SENSORES E CABOS TCVC: DESTACA-SE QUE NA MESMA CANALETA INSTALOU-SE TFOR E TFOB PARA COMPARAÇÃO.....	81
FIGURA 39 - COBERTURA DOS APARELHOS COM CONCRETO CONVENCIONAL FLUIDO	82
FIGURA 40 - PROTEÇÃO COM CONCRETO CONVENCIONAL DA REGIÃO INSTRUMENTADA - TCVC	82
FIGURA 41 - LANÇAMENTO DE CCR SOBRE A REGIÃO INSTRUMENTADA - TCVC.....	82
FIGURA 42 - COMPACTAÇÃO CUIDADOSA COM COMPACTADOR MANUAL SOBRE A REGIÃO INSTRUMENTADA TCVC: DESTACA-SE QUE O ROLO COMPACTA A REGIÃO ADJACENTE.....	83
FIGURA 43 - RESULTADOS DE LEITURAS DE TERMÔMETROS TCVC INSTALADOS NA EL. 670,00.....	83
FIGURA 44 - RESULTADOS DE LEITURAS DE TERMÔMETROS TCVC INSTALADOS NA EL. 680,00.....	84
FIGURA 45 - RESULTADOS DOS TERMÔMETROS TCVC INSTALADOS NA EL. 690,00	84
FIGURA 46 - RESULTADOS DE LEITURA DOS TERMÔMETROS TFOB INSTALADOS NA EL. 680,00.....	85
FIGURA 47 - RESULTADOS DE LEITURA DOS TERMÔMETROS TFOB INSTALADOS NA EL. 690,00.....	85
FIGURA 48 - LOCAÇÃO COM TRENA DE LOCAL A SER LANÇADO O CABO TFOR E CRAVAÇÃO DE PREGOS GUIAS	86
FIGURA 49 - FIXAÇÃO DE ARAME NO PREGO GUIA - TFOR	86
FIGURA 50 - CRAVAÇÃO FINAL DO PREGO COM O ARAME - TFOR.....	86
FIGURA 51 - SITUAÇÃO FINAL DO ARAME DE FIXAÇÃO DOS CABOS TFOR.....	87
FIGURA 52 - RETIRADA DA BOBINA DE CABOS TFOR QUE ESTAVA SOBRE A FÔRMA DA FACE DE MONTANTE.....	87
FIGURA 53 - ESTICAMENTO DOS CABOS TFOR A PARTIR DA BOBINA.....	87
FIGURA 54 - POSICIONAMENTO DOS CABOS TFOR SOBRE OS PREGOS GUIAS E ARAMES DE FIXAÇÃO.....	88
FIGURA 55 - FIXAÇÃO DOS CABOS DE FIBRA ÓTICA TFOR COM O ARAME PRESO AO PREGO GUIA	88

FIGURA 56 - SITUAÇÃO FINAL DOS CABOS DE FIBRA ÓTICA TFOR ESTENDIDOS E FIXADOS SOBRE A PRAÇA	88
FIGURA 57 - REPOSIÇÃO DA BOBINA DE CABOS TFOR SOBRE A FÔRMA DA FACE DE MONTANTE	89
FIGURA 58 - APLICAÇÃO DE CCV DE FACE DE MONTANTE SOBRE O CABO DE FIBRA ÓTICA TFOR INSTALADO	89
FIGURA 59 - APLICAÇÃO DE ARGAMASSA DIRETAMENTE SOBRE O CABO DE FIBRA ÓTICA TFOR	89
FIGURA 60 - DESCARGA DE CCR SOBRE O CABO DE FIBRA ÓTICA TFOR.....	90
FIGURA 61 - ESPALHAMENTO DO CCR SOBRE O CABO DE FIBRA ÓTICA TFOR	90
FIGURA 62 - DETALHE DO SISTEMA DE LEITURA SENSORES TFOR	90
FIGURA 63 - CAMPOS DE TEMPERATURA OBTIDOS DAS LEITURAS DOS TERMÔMETROS TFOR, EM 08/09/05, 19:00 H – PRIMEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÕES	91
FIGURA 64 - CAMPOS DE TEMPERATURA OBTIDOS DAS LEITURAS DOS TERMÔMETROS TFOR, EM 15/09/05, 16:00 H - PRIMEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÕES	92
FIGURA 65 - CAMPOS DE TEMPERATURA OBTIDOS DAS LEITURAS DOS TERMÔMETROS TFOR, EM 27/11/05, 21:30 H, DETALHE PARA CAMADA RECÉM LANÇADA ACUSANDO MAIOR TEMPERATURA - SEGUNDA CAMPANHA DE MEDIÇÕES	92
FIGURA 66 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DAS LEITURAS DE TFOB E TCVC EL 680,00 MONTANTE.....	93
FIGURA 67 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DAS LEITURAS DE TFOB E TCVC EL. 680,00 JUSANTE.....	93
FIGURA 68 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DAS LEITURAS DE TFOB E TCVC EL. 690,00 MONTANTE.....	94
FIGURA 69 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DAS LEITURAS DE TFOB E TCVC EL. 690,00 JUSANTE.....	94
FIGURA 70 - DETALHE DAS EMENDAS DE CABOS TFOB, UTILIZANDO <i>I-ÓPTICO</i>	96
FIGURA 71 - RESULTADOS DE COMPARAÇÃO SENSORES TCVC 01 E TFOR NA POSIÇÃO DO TCVC 01 EL. 670,00 MONTANTE.....	98
FIGURA 72 - RESULTADOS DE COMPARAÇÃO SENSORES TCVC 02 E TFOR NA POSIÇÃO DO TCVC 02 EL. 670,00 CENTRO.....	98
FIGURA 73 - RESULTADOS DE COMPARAÇÃO SENSORES TCVC 03 E TFOR NA POSIÇÃO DO TCVC 03 EL. 670,00 JUSANTE.....	99
FIGURA 74 - RESULTADOS DE COMPARAÇÃO SENSORES TCVC 04 E TFOR NA POSIÇÃO DO TCVC 04 EL. 680,00 MONTANTE.....	99
FIGURA 75 - RESULTADOS DE COMPARAÇÃO SENSORES TCVC 05 E TFOR NA POSIÇÃO DO TCVC 05 EL. 680,00 JUSANTE.....	100
FIGURA 76 - EXECUÇÃO DA EMENDA DOS CABOS DE FIBRA ÓTICA TFOR.....	101
FIGURA 77 - DETALHE DOS CABOS DE FIBRA ÓTICA TFOR EMENDADOS	101

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CBGB - COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS, ATUALMENTE CBDB

CCR - CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

COPEL - COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA

DFOT - MEDIÇÃO DISTRIBUÍDA DE TEMPERATURA UTILIZANDO FIBRA ÓTICA

DTS - SENSOR DE MEDIÇÃO DISTRIBUÍDA DA TEMPERATURA

DTSS - SENSOR DE MEDIÇÃO DISTRIBUÍDA DA TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO

GPS - SISTEMA DE GEOPOSICIONAMENTO GLOBAL

I-OPTICO - DISPOSITIVO DE EMENDA DE TOPO DE FIBRAS ÓTICAS

LACTEC - INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

LVDT - TRANSFORMADOR DIFERENCIAL DE VARIÁVEL LINEAR

PPGCC - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

RAA - REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

TCVC - TERMÔMETRO CONVENCIONAL DE CORDA VIBRANTE

TFOB - TERMÔMETRO DE FIBRA ÓTICA PELO MÉTODO REDES DE BRAGG

TFOR - TERMÔMETRO DE FIBRA ÓTICA PELO MÉTODO DISTRIBUÍDO RAMAN

TUM – UNIVERSIDADE TÉCNICA DE MUNIQUE

UFPR - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RESUMO

Esta dissertação buscou contribuir para a resolução do problema de como melhorar a instrumentação de barragens de CCR, visando propiciar melhor conhecimento das características do material e da estrutura, contribuindo para implantação de medidas de prevenção de patologias que possam interferir na segurança e na durabilidade. Para contribuir na resolução do problema o trabalho teve como objetivo verificar se a instrumentação por fibra ótica propicia maior abrangência de amostragem e conhecimento de múltiplas características de barragens de CCR. A hipótese a ser comprovada foi que a instrumentação por fibra ótica permite melhor caracterização e conhecimento mais abrangente das características do CCR que os métodos tradicionais. Como limitação do trabalho esta verificação foi restrita a medição de temperatura. A justificativa que deu origem a pesquisa em questão veio da necessidade premente de melhorar as condições de segurança e monitoramento das barragens brasileiras por motivos técnicos, sociais e ambientais. Como o resultado obtido da pesquisa pode se concluir pela confirmação da hipótese de pesquisa, propiciando conhecimento tecnológico novo ao meio técnico nacional de barragens.

Para o desenvolvimento da dissertação foram comparados dois sistemas de instrumentação por fibra ótica com um sistema de instrumentação convencional. Os três tipos foram aplicados tendo como protótipo a barragem de concreto compactado com rolo (CCR) de UHE Fundão durante seu período construtivo. Como limitação da pesquisa, esta comparação foi feita baseado apenas na medição da temperatura, visto ser esta uma das mais importantes características a ser medida durante a construção de uma barragem de concreto.

ABSTRACT

This dissertation has been developed with the aim of contributing to the improvement of instrumentation of RCC dams, envisaging better knowledge of materials characteristics and structural behaviour, contributing to the installation of preventive actions to inhibit pathologies, which may interfere in structural safety and stability. In this sense, this work had the objective of verifying whether the optic fiber instrumentation could provide a wider knowledge of several characteristics of roller compacted concrete dams (RCC). As hypothesis to be proved, it has been admitted that optic fiber instrumentation allows a better characterization and knowledge of RCC characteristics compared to traditional methods. The justification, which gave rise to the research in focus, came from the constant necessity of improving safety conditions and monitoring of Brazilian dams for technical, economical and environmental reasons. As a result obtained from this work, it could be confirmed the research hypothesis, providing a new technological knowledge to the national Dams technical field.

For the development of this dissertation two optic fiber instrumentation systems were compared to a conventional one. The three systems were applied in the RCC dam of the Hydroelectric Powerplant of Fundão during the construction period. In order to establish limits for this research, the comparison was restricted to temperature measurements, since this is one of the main parameters to be followed during construction of a concrete dam.

1 INTRODUÇÃO

O tema escolhido para a dissertação teve como origem a ocorrência de patologias em obras de Concreto Compactado com Rolo (CCR) no Brasil, em especial fissuras (SOARES et al., 2003). Ressalta-se que, para estes casos, a instrumentação convencional existente não apresentou dados que permitissem conhecimento suficiente do material a ponto de se tomar medidas preventivas ou mesmo comprovar teorias de causas e efeitos posteriormente.

Na busca por sistemas que pudessem melhorar a instrumentação de barragens de CCR, visando propiciar conhecimento mais abrangente das características do material e da estrutura, contribuindo para implantação de medidas de prevenção de patologias que possam interferir na segurança e ou durabilidade, foi identificado como melhor objetivo para a dissertação, a verificação da eficácia de instrumentação por fibra ótica.

1.1 OBJETIVO DA PESQUISA

Verificar se a instrumentação por fibra ótica propicia maior abrangência de amostragem e conhecimento de múltiplas características de barragens de CCR que a convencional, validando a medição de temperatura e indicando as demais potencialidades.

1.2 HIPÓTESE

A instrumentação por fibra ótica propicia a caracterização e conhecimento das características monitoráveis do CCR, em especial temperatura, de maneira mais abrangente e distribuída do que os métodos tradicionais.

1.3 JUSTIFICATIVAS

1.3.1 Justificativa Tecnológica

Conforme mostrado em estudos da ELETROBRÁS (2002), especialistas do ministério das Minas e Energia prevêem que o aumento da capacidade de geração entre 2000-2009 será de cerca de 30.000 MW o que significa aumento de 45% em relação à capacidade de geração instalada em 1999. Considerando que a energia gerada no País provém 90% de empreendimentos hidrelétricos (ELETROBRÁS, 2002), para atingir este objetivo será necessário executar um aumento proporcional do número de barragens.

Segundo PINTO (1997), para atingir tal meta, seria necessária a construção de cerca de 100 barragens no período de 10 anos.

A comparar que nos últimos anos houve uma desaceleração na construção de novas usinas conforme obras e licitações apresentadas por ANEEL (2006) é de esperar para os próximos anos uma necessidade ainda maior da taxa de expansão anual para o período de 2006 até 2009 sob pena da ocorrência de racionamento de energia como em 2001 (ANEEL, 2006).

Destas 100 barragens previstas e cuja maior parte ainda não foi sequer iniciada, grande parte poderia utilizar CCR, uma vez que esta tecnologia, conforme DUNSTAN (2003), vem sendo bastante utilizada na construção de barragens, tanto no Brasil quanto no mundo. Destaca-se que o Brasil é o quarto país com maior número de barragens de CCR no mundo, tendo em 2002, 29 das 251 barragens de CCR construídas (DUNSTAN, 2003).

Sabendo-se que a instrumentação é elemento vital para a segurança das barragens (CBGB, 1996), destaca-se como justificativa tecnológica que o projeto em questão será importante para o plano nacional de expansão, pois propiciará ao meio técnico nacional uma nova ferramenta para melhor entendimento do comportamento de estruturas de barragens de CCR. Esta tecnologia, aplicada em outras barragens de

CCR no mundo, indica que este sistema de instrumentação abre uma nova dimensão no monitoramento de barragens em vista da possibilidade de leitura distribuída permitindo melhorar critérios de projeto e aumentar a segurança da barragem (AUFLEGER et al., 2003).

Também, se destaca como justificativa tecnológica a apresentação ao meio técnico nacional de opção para modernizar a instrumentação das barragens de concreto já existentes, uma vez que conforme a experiência de KRONENBERG (1997), a instrumentação por fibra ótica mostrou-se uma opção válida para reposição ou expansão de instrumentação já existente.

Destaca-se que cerca de 47 das grandes barragens de concreto instrumentadas do Brasil apresentadas em CBGB (1996) já operam a mais de 20 anos. Dentre estas se incluem as quatro maiores barragens de concreto do Brasil em volume: Itaipu, Tucuruí, Ilha Solteira e Itumbiara, que juntas somam cerca de 6.000 instrumentos instalados, significando uma grande parte dos instrumentos instalados em barragens de concreto no Brasil (CBGB, 1996).

Outro fator tecnológico relevante é a carência de experiências em instrumentação por fibra ótica no Brasil. Esta é limitada a alguns poucos esforços em desenvolvimento de sensores não distribuídos e a quase nenhum foco no conceito de Estruturas Inteligentes ou *SMART STRUCTURES* e materiais inteligentes ou *SMART MATERIALS*, conforme citado em WATKINS (2003) enquanto que no mundo cada vez mais os países estão investindo significativamente no desenvolvimento de pesquisas sobre assunto.

Podem-se destacar como exemplo do interesse dos países em pesquisas sobre o assunto os fatos de que as pesquisas de HABEL (1997) terem sido financiadas pelo Governo Alemão, as pesquisas de POLOSSO (2001) patrocinadas pela Marinha Americana e pela *Federal Highway Administration*, esta última também financiadora das pesquisas de DAVIS (1997). As pesquisas de ANSARI (1997) e WATKINS (2003) foram financiadas pela Fundação Nacional de Ciência do Canadá, e as

pesquisas de GLISIC (1999) e KRONENBERG (1997) pelo Instituto Federal Suíço de Tecnologia, sendo este último suportado também pela Comissão Suíça de Tecnologia e Inovação.

Outro registro que denota a importância dada à pesquisa sobre instrumentação por fibra ótica no mundo é o fato que o aparelho de leitura de temperatura pelo método distribuído utilizando fibra ótica desenvolvido na Inglaterra ganhou o prêmio de “Produto do Milênio” pelo Comitê Inglês de Inovação Científica (SENSA, 2002).

1.3.2 Justificativa Econômica

Conforme KRONENBERG (1997), a instrumentação e o monitoramento de estruturas de empreendimentos hidrelétricos, especialmente as barragens, sempre têm significância econômica, social e ambiental, já que é fundamental para garantir a segurança da estrutura e dos seus usuários, assim como otimizar o seu uso e a sua manutenção. Baseada na afirmação deste, destaca-se como justificativas econômicas de implantação de instrumentação, a otimização dos custos de manutenção das barragens e diminuição do custo do risco de uma ruína propiciado pelo mais adequado e abrangente monitoramento, que conforme GLISIC (1999), é esperado com a utilização de fibras óticas.

Outra justificativa econômica destacável é a possibilidade de revitalização da instrumentação de barragens já existentes. Segundo ANSARI (1997), a maior fonte de recursos para a pesquisa sobre instrumentação de estruturas com fibra ótica no mundo provém de organismos interessados em revitalização de infra-estrutura pública já que para este fim se faz necessária tecnologia avançada e inovadora.

Como exemplo do benefício da instrumentação por fibra ótica na revitalização de infra-estrutura pública pode-se destacar o apresentado por MICHIE (1997), citando que a instrumentação por fibra ótica traz grande benefício ao monitoramento da condição estrutural de pontes dada a capacidade de se detectar problemas estruturais em idades precoces. Este fato é de relevante benefício

econômico, porque tanto na Europa como Estados Unidos, porcentagem significativa das estruturas civis apresenta problemas graves, sendo que na Europa ocidental cerca de 32% do valor aplicado em construção foi gasto com revitalização de pontes (MICHIE, 1997).

Pesquisas sobre instrumentação de barragens têm considerável benefício econômico, pois a instrumentação em uma barragem representa cerca de 0,06 a 0,30% do valor total (CBGB, 1996) e com a sua otimização aumenta consideravelmente a segurança e diminui o risco de ruína (GLISIC, 1999).

1.3.3 Justificativa Social

Várias barragens de CCR no Brasil são construídas em regiões mais pobres como, por exemplo, a região Nordeste, sendo que muitas delas são planejadas para armazenamento de água para utilização em períodos de estiagem (ANDRIOLO, 2002). Como a tecnologia da instrumentação por fibra ótica pelo método distribuído utiliza fibras normais de telecomunicação (WATLEY e JOHANSSON, 2005), as fibras podem ser adquiridas facilmente no mercado nacional. Esta facilidade de aquisição comparada com a necessidade de importação verificado para os sensores convencionais facilita o processo de disseminação de conhecimento e incentiva a utilização de instrumentação aumentando a segurança da barragem e reduzindo o custo de manutenção, economizando recursos já escassos na região.

Da mesma forma a redução de custos com manutenção de infra-estrutura pública, citado por ANSARI (1997) e MICHIE (1997), propiciada pelo melhor monitoramento com a utilização de instrumentação com fibra ótica (KRONENBERG, 1997), reverte em benefícios sociais, pois o valor economizado com manutenção (MICHIE, 1997), pode ser aplicado em outras prioridades de relevante cunho social.

1.3.4 Justificativa Ambiental

Conforme KRONENBERG (1997), a instrumentação e o monitoramento de estruturas de empreendimentos hidrelétricos em especial barragens sempre tem

significância ambiental, já que a sua construção e operação devem ser feitas de modo a minimizar danos ambientais.

A instrumentação por fibra ótica, em relação à convencional, tem tamanho menor, não tem condutividade, nem risco de choque elétrico, não atrai descargas elétricas atmosféricas, não interfere com campos eletromagnéticos ou ondas de rádio e é mais resistente à corrosão, não necessitando de acessórios de proteção (CHOQUET et al., 2000), tendo impactos menos significativos que aqueles causados pela instrumentação convencional.

1.4 MÉTODO DE PESQUISA

Dos três principais métodos de pesquisa apresentados por ROBSON (1993): Estudos de caso, *Survey* e Experimento, foi adotado o método do estudo de caso.

O método do estudo de caso que conforme YIN (1994) se refere a desenvolvimento de detalhado e intensivo conhecimento sobre um único caso ou um pequeno número de casos relatados, foi o que mais se aplicou a pesquisa em questão, pois não requer controle sobre os eventos (ROBSON, 1993), o que é bastante desejável no caso de estudo sobre instrumentação de uma estrutura. O estudo de caso será dirigido a validação da medição da temperatura, sendo que as demais potencialidades serão indicadas a partir da revisão bibliográfica

O método do experimento foi descartado para a pesquisa em questão, por não ser possível controlar as variáveis (ROBSON, 1993) na avaliação de uma estrutura instrumentada com fibra ótica.

O método da *Survey*, conforme ROBSON (1993), refere-se à coleta de informações de maneira padronizada em população específica. Este método não foi utilizado pelo fato de que a tecnologia da instrumentação por fibra ótica aplicada em barragens é recente (AUFLEGER, 2005), sendo reduzida a quantidade de profissionais nas áreas citadas de conhecimento. Este fato deixaria o método em questão com pouca representatividade estatística e, assim sujeito a problemas de validação.

1.4.1 Critério de Seleção de Estudo de Caso

Foi escolhido como protótipo para o estudo de caso a barragem de CCR de UHE Fundão no estado do Paraná, por ter a participação da COPEL e LACTEC patrocinadores da referida pesquisa, por estar em fase de construção e por possuir instrumentação convencional prevista. No item 3.2.1 é mais bem descrito o empreendimento de UHE Fundão.

O fato da COPEL ser acionária na ELEJOR, proprietária da obra, facilitou a autorização para utilização da barragem como protótipo para a pesquisa. Da mesma forma, o fato do LACTEC já atuar na obra em outras atividades, facilitou o acesso a recursos no local.

A existência de instrumentação convencional nesta obra permitiu a comparação e validação da técnica proposta de instrumentação por fibra ótica, já que ambas puderam ser instaladas em mesmo bloco da barragem, diminuindo as incertezas estatísticas do estudo.

O fato da obra estar em construção facilitou o processo de instalação, já que, a instalação dos sensores pode ser feita concomitantemente com o alteamento da barragem.

1.4.2 Protocolo de Coleta de Dados

A coleta dos dados para o estudo de caso foi feita utilizando o método observacional direto, conforme proposto por ROBSON (1993), verificando o resultado da aplicação da instrumentação por fibra ótica no protótipo UHE Fundão, pelo processo de compra, instalação e leitura dos instrumentos.

A análise dos dados do estudo de caso foi feita pelo processo de indução analítica, conforme proposto por ROBSON (1993), onde foram verificados os resultados a luz das hipóteses assumidas, no caso a hipótese da pesquisa.

1.4.3 Unidade de Análise

A barragem de Fundão está dividida em 25 blocos, pela necessidade de

garantir a segurança quanto aos esforços gerados pelas reações termogênicas do concreto.

A unidade de análise escolhida foi o bloco 11 do protótipo, ou seja, o bloco número 11 da barragem de UHE Fundão. A razão da escolha baseia-se no fato de que este é o bloco com maior número de instrumentos convencionais de projeto. Esta maior concentração de instrumentação é fruto do critério adotado pela projetista da barragem, ou seja, instrumentar melhor o bloco mais alto. Outros blocos foram instrumentados, porém não fazem parte da unidade de análise escolhida para a pesquisa.

1.4.4 Validação Interna

A validação interna foi feita comparando-se o comportamento e tendências dos resultados de leitura dos instrumentos por fibra ótica com os convencionais, de uso já consagrado em experiências anteriores (MUSSI et al., 1999). Foram também analisadas as influências do processo de instalação de ambos. Para tanto se utilizou a técnica das considerações conflitantes (MILES e HUBERMAN, 1987).

1.4.5 Validação Externa

A validação externa se deu pela comparação com instrumentação convencional utilizada em outras obras (MUSSI et al., 1999) e pela utilização de parceiros especializados, com experiência em cada tipo de instrumentação por fibra ótica.

1.5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

O Estudo de Caso visou exclusivamente verificar a implantação da instrumentação por fibra ótica em barragens de CCR no Brasil. Em vista da importância da medição da temperatura no controle de patologias em barragens de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994), o estudo se limitou apenas à medição desta

característica. Extensômetros foram instalados apenas para verificar a influência nos sensores de temperatura utilizando redes de Bragg quando da aplicação em série de ambos. Na validação foi escolhida a comparação com a instrumentação por corda vibrante, por ter sido utilizada com sucesso em barragens de CCR recentemente construídas (MUSSI et al., 1999).

As conclusões foram limitadas à quantidade possível de leituras efetuadas na barragem protótipo para cada sistema de instrumentação por fibra ótica estudado, em vista da disponibilidade limitada dos aparelhos de leitura durante o período da pesquisa.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No primeiro capítulo foram apresentadas as questões introdutórias como objetivo da pesquisa, hipótese a ser pesquisada, justificativa e limitações do trabalho. No capítulo 2, foram descritos os conceitos, os registros históricos e experiências mundiais em instrumentação por fibra ótica em barragens com ênfase para experiências em barragens de CCR. No Capítulo 3 foi apresentado o método utilizado para verificar a hipótese de pesquisa adotada, apresentando a justificativa pela escolha do método do estudo de caso, o planejamento do estudo de caso, protocolo de coleta de dados e outras informações relevantes ao método utilizado. No Capítulo 4, foram apresentados os resultados obtidos e análises, incluindo a preparação para o estudo de caso e a aplicação em protótipo. E por fim, no Capítulo 5 é apresentada a conclusão da dissertação.

2 INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS DE CCR UTILIZANDO FIBRA ÓTICA

2.1 BARRAGENS DE CCR

2.1.1 Aspectos Históricos

Conforme o CBGB (1989), considera-se a barragem de Saad-el-Kaffar como a barragem mais antiga do mundo, datada de 2950 AC a 2750 AC. Desde então, as barragens vêm sendo executadas na história da humanidade, tendo sido utilizado posteriormente, também, as barragens em alvenaria, enrocamento e mistas. Com a descoberta do cimento Portland por Joseph Aspdin em 1824 (ABCP, 2006), o concreto passou a ser utilizado na execução de barragens. A primeira barragem executada unicamente de concreto que se tem registro é a barragem de San Mateo, nos Estados Unidos da América, construída entre 1887-1889 (CBGB, 1989).

Conforme o mesmo autor, com o desenvolvimento da tecnologia e dos critérios de cálculo, as barragens quer sejam de terra, enrocamento, concreto ou mistas passaram a atingir alturas e volumes cada vez maiores.

No Brasil a grande seca vivida no nordeste no final do século XIX levou o governo imperial a constituir comissão composta por engenheiros para planejar a construção de barragens. Sendo que a primeira barragem que se tem notícia no Brasil foi construída em 1884 (CBGB, 1989).

Do começo do século até 1930 houve um incremento muito grande na construção de barragens destinadas à produção de energia, irrigação e abastecimento de água, passando-se a utilizar também concreto como material de construção. A partir de 1930 a investigação dos materiais passa a ser feita de maneira mais judiciosa e científica. A construção da Hidrelétrica de Paulo Afonso em 1948 marca o início da construção de grandes barragens em empreendimentos hidrelétricos, que tem seu

ponto culminante com a construção entre 1975 a 1984, da Usina Hidrelétrica de Itaipu (CBGB, 1989).

Conforme MARQUES FILHO (2005), na busca de se projetar barragens de concreto que pudessem ser construídas mais rápida e economicamente, em relação àquelas onde se empregam os métodos construtivos convencionais, foi desenvolvida a aplicação e CCR.

A tecnologia do CCR é recente (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Conforme ANDRIOLO (1989) data de 1962, na construção da barragem de Shimen em Formosa, o primeiro lançamento de CCR em uma ensecadeira (estrutura de barramento auxiliar e temporário utilizado apenas durante o período de construção). No período que seguiu várias pesquisas e aplicações experimentais, foram efetuadas no Canadá, Japão, Estados Unidos da América e Brasil. Em 1982, foi concluída a barragem de Willow Creek nos Estados Unidos a primeira totalmente construída com CCR (ANDRIOLO, 1989). No Brasil, a primeira barragem de CCR foi a barragem de Saco de Nova Olinda, no estado da Paraíba construída em 1986 (ANDRADE et al., 2003). A partir da década de 90 com a construção da barragem de Derivação do Rio Jordão pela COPEL, a tecnologia de construção de barragens se consolidou no Brasil (ANDRIOLO, 2002).

Segundo DUNSTAN (2003), em 2002, o Brasil era o quarto país com maior número de barragens de CCR, tendo 29 das 251 barragens de CCR construídas no mundo (DUNSTAN, 2003). Segundo ANDRADE et al. (2003), até 2003 já haviam sido aplicados no Brasil 8.260.000 m³ deste material em barragens. Segundo o mesmo autor este número passaria para 10.483.000 m³ incluindo as barragens em construção em 2003.

MEHTA e MONTEIRO (1994) descrevem o conceito de CCR como um concreto sem abatimento transportado lançado e compactado, com o mesmo equipamento de construção que é usado para barragens de terra e enrocamento e que possa satisfazer as especificações de projeto de concreto massa convencional. MOSER

et al. (2003) destaca a importância da equipe de controle de qualidade para que o CCR possa atingir o mesmo grau de qualidade do concreto massa convencional.

MARQUES FILHO (2005) mostra os principais passos da execução de uma obra de CCR e suas diversas frentes de trabalho para um dos possíveis esquemas construtivos utilizados normalmente, onde:

- transporte: executado por caminhões basculantes. Outra possibilidade muito empregada é a utilização 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.

Na Figura 1, extraída de MARQUES FILHO (2005), apresenta-se um exemplo de lançamento típico pelo método tradicional de camadas horizontais com formas das faces de montante e jusante executados na solução temporariamente fixas e manuseadas por empilhadeiras ou guindaste leves, sendo os paramentos de montante e jusante em concreto convencional.

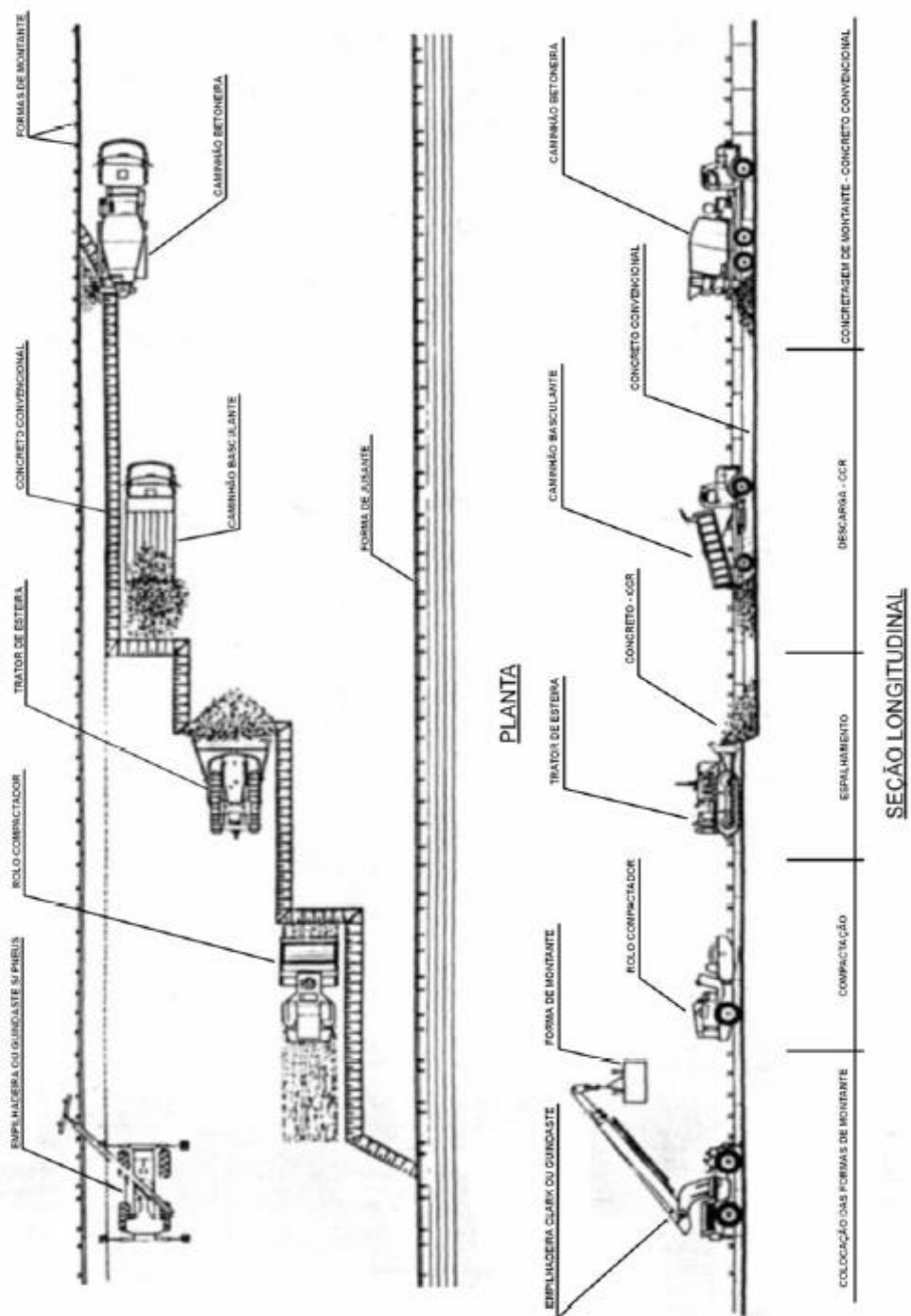


FIGURA 1 - ESQUEMA DE LANÇAMENTO DE CCR EM BARRAGENS (MARQUES FILHO, 2005)

2.1.2 Histórico da Instrumentação de Barragens de Concreto no Brasil

Conforme CBGB (1996), no início do século a instrumentação de auscultação de barragens se limitava às medições topográficas de deslocamento. Entretanto, à medida que a altura das barragens aumentava e suas geometrias adquiriam formas mais inovadoras e ou mais arrojadas, foram desenvolvidas técnicas de medição e tornaram-se essenciais nas grandes barragens, para a avaliação de seu desempenho e de suas condições de segurança. Segundo o mesmo autor, à medida que originalmente limitavam-se apenas às estruturas de concreto propriamente ditas, foram então estendidas às fundações, passando a receber maiores atenções.

Conforme MARQUES FILHO (2005), o comportamento da fundação é essencial para a estabilidade da barragem.

Nas primeiras barragens de concreto instrumentadas no Brasil, as observações se limitavam essencialmente à auscultação de subpressões na região do contato concreto-rocha e das vazões de drenagem, apenas na construção da barragem de Funil, com solução de arco em concreto, construída na década de 60 se constituiu uma das primeiras estruturas bem instrumentadas em vista do seu grande porte (CBGB, 1996).

Conforme CBGB (1982), a barragem de Funil tem 85 m de altura e 385 m de comprimento, tendo sido nela instalados os seguintes instrumentos:

- 3 pêndulos invertidos;
- 1 pêndulo direto;
- 1 pêndulo ótico;
- 49 medidores de junta;
- 49 termômetros;
- 83 piezômetros;
- 53 deformímetros;
- 120 extensômetros no concreto;
- 31 extensômetros na rocha.

Segundo CBGB (1996), a instalação de uma instrumentação mais abrangente nas estruturas das barragens no Brasil teve impulso a partir do final da década de 60 e início de 70, com a construção de algumas barragens de grande porte no rio Paraná, integrantes do complexo de Urubupungá. O mesmo autor registra que estas barragens passaram a contar com a instalação de pêndulos diretos e invertidos, extensômetros múltiplos na fundação, cadeias clinométricas, além da instrumentação completa do corpo da barragem (deformímetros e tensômetros, câmaras atensoriais, medidores elétricos de junta, termômetros, etc.).

Conforme (CBGB, 1996), no tocante a barragens de concreto, nos anos 80 a dificuldade ou impossibilidade de importação fez com que fossem desenvolvidos vários instrumentos de procedência nacional, exceção aos instrumentos embutidos no concreto. Neste período iniciou-se também a aplicação de recursos de informática no monitoramento dessas obras. A partir dos anos 90 processa-se a informatização das fases de coleta, transmissão, processamento e análise dos dados e iniciam-se algumas automações da instrumentação de barragens. Assim sendo, a instrumentação é elemento sempre presente no monitoramento de barragens (CBGB, 1996).

2.1.3 Objetivos Básicos da Instrumentação de Barragens

Conforme CBGB (1996) no período construtivo o objetivo básico da instrumentação consiste em alertar a ocorrência de eventuais anomalias no comportamento da barragem ou de condições que possam favorecer ao aparecimento de patologias indesejáveis, como, por exemplo, condições térmicas que possam dar origem a fissuras.

Segundo o mesmo autor a instrumentação nesta fase também busca possibilitar ações menos conservadoras na fase de projeto e, conseqüentemente, economia para futuras obras, e fornecer informações sobre parâmetros específicos dos materiais da barragem e suas fundações durante a construção, bem como possibilitar revisões de projeto e fornecer informações sobre melhor época para realização de certas operações construtivas. Conforme o mesmo autor no período de enchimento o

objetivo é alertar para a ocorrência de eventuais anomalias que possa colocar em risco a segurança das estruturas de barramento, possibilitar avaliação estrutural, verificar adequação dos critérios de projeto e verificar as simplificações introduzidas e hipóteses formuladas.

ROSSO e PIASENTIM (1996) destacam a função da instrumentação é estimar a segurança das estruturas e prever possíveis regiões de risco durante a construção e operação.

CBGB (1996) cita que no período operacional, mesmo após alguns anos de operação, a instrumentação permite:

- verificar o desempenho geral da barragem comparando com aquele previsto no projeto;
- caracterizar o comportamento do solo e/ou do maciço rochoso da fundação e das estruturas de barramento no tempo;
- caracterizar o comportamento das estruturas da barragem em função da carga hidráulica, condições térmicas ambientais e fator tempo.

Ainda segundo o CBGB (1996), a instrumentação da barragem está intimamente ligada a vários fatores importantes para a sua construção, operação e manutenção, sendo que um dos principais é monitoramento de sua segurança (CBGB, 1996).

ROSSO e PIASENTIM (1996) consideram que a instrumentação deve fornecer dados durante a construção para verificar hipóteses de projeto e possibilitar modificações e otimização dos mesmos. O mesmo autor cita, como exemplo, que medições de temperatura permitem verificar temperaturas máximas no concreto e possibilitar modificações na composição do traço e velocidade de colocação admissível. Outras medidas cabíveis para este exemplo são indicadas por MEHTA e MONTEIRO (1994), tais quais pré-refrigeração, pós-refrigeração, isolamento superficial, ou mesmo conforme PEREIRA e KUPERMANN (2002), utilização de cimento pozolânico.

Conforme CBGB (1996), da mesma forma que no período de construção, pode-se dizer que a barragem dotada de projeto bem elaborado será tão mais segura, em termos construtivos, quanto mais próxima estiver das condições preconizadas no projeto. Também, durante a fase de manutenção/operação a segurança estará relacionada à adequada inspeção, ao monitoramento pelos instrumentos de auscultação apropriados e a operação sendo feita por equipe treinada para situações de emergência. Conforme o mesmo autor, os instrumentos utilizados em uma barragem buscam responder perguntas de projeto e monitorar as condições específicas desejadas, de forma que existem diversos tipos de instrumentos instalados em barragens.

2.1.4 Principais Instrumentos Utilizados em Barragens de Concreto

Conforme CBGB (1996), existem vários tipos de instrumentos aplicados em barragens cada qual visando controlar determinada característica específica.

Com base no exposto em CBGB (1996), de um modo geral, estes instrumentos podem atuar tanto na estrutura de concreto como na fundação, abaixo são citados os principais instrumentos para cada local de medição.

2.1.4.1 Instrumentos instalados na estrutura da barragem de concreto

CBGB (1996) lista como instrumentos que atuam apenas na estrutura de concreto:

- a) pêndulos;
- b) clinômetros;
- c) medidores de junta unidirecionais e triortogonais
- d) deformímetros;
- e) tensômetros;
- f) termômetros;
- g) medidores de vazão e
- h) marcos superficiais.

A função de cada instrumento é detalhada no item 2.1.4.3.

2.1.4.2 Instrumentos instalados na fundação da barragem

Segundo CBGB (1996), na instalação exclusiva para controle da fundação da barragem utilizam-se, principalmente:

- a) pêndulos invertidos;
- b) extensômetros múltiplos ;
- c) piezômetros de fundação;
- d) medidores de vazão e
- d) sismógrafos e acelerógrafos.

A função de cada instrumento é detalhada no item 2.1.4.3.

2.1.4.3 Escolha dos instrumentos a serem instalados em barragens de concreto

Segundo MARQUES FILHO (2005), a partir de uma seção típica de uma barragem de concreto, conforme apresentado na Figura 2, diferentes efeitos devem ser considerados na escolha dos instrumentos a serem utilizados:

- efeitos da reação termogênica do cimento;
- concentrações de tensão devido à conformação geométrica da estrutura e da fundação;
- efeito de subdireção devida à percolação pelo maciço de concreto e suas fundações;
- efeito de fluência principalmente 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.
- envoltórias de resistência das interfaces concreto-rocha e das juntas entre as camadas de concretagem sucessivas;
- garantia da continuidade das propriedades do concreto e evitar a

- formação de caminhos preferenciais de percolação;
- aderência concreto-rocha;
 - efeito de reações deletérias dos materiais componentes do concreto, principalmente a reação álcali-agregado.

Segundo VEIGA et al. (1997), entende-se por reação álcali agregado (RAA) o processo químico onde alguns constituintes mineralógicos do agregado reagem com hidróxidos alcalinos, provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, pozolanas, agentes externos, etc., e que são dissolvidos na solução dos poros do concreto, tendo como produto da reação um gel higroscópico expansivo.

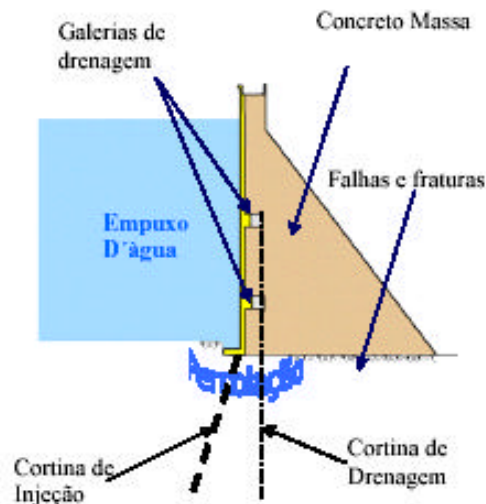


FIGURA 2 - SEÇÃO ESQUEMÁTICA TÍPICA DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO (MARQUES FILHO, 2005)

CBGB (1996) sugere uma combinação de instrumentos para medir cada patologia mais importante que deve ser monitorada em barragens de concreto:

- a) escorregamento da fundação: para monitorar o escorregamento da fundação são utilizados piezômetros, pêndulos invertidos, medidores de junta e extensômetros múltiplos;
- b) obstrução do sistema de drenagem: a obstrução do sistema de drenagem pode ser detectada por piezômetros e medidores de vazão;
- c) fissuração térmica: a fissuração térmica pode ser detectada por termômetros, medidores de junta, deformímetros;

- d) fissuração por RAA: a fissuração por RAA pode ser detectada por medidores de junta ou extensômetros aplicados no maciço;
- e) fissuração por tensões estruturais: a fissuração por tensões estruturais pode ser detectada por deformímetros e tensômetros;
- f) fissuração por recalque diferencial: a fissuração por recalque diferencial pode ser detectada por extensômetros múltiplos e medidores de junta;
- g) fissuração por sismos: a fissuração por sismos pode ser detectada por sismógrafos e acelerógrafos;
- h) fissuração por recalque da fundação: a fissuração por recalque de fundação por piezômetros e extensômetros.

Segundo ROSSO e PIASENTIM (1996) para se obter um bom projeto de instrumentação:

- o número de instrumentos deve ser o mínimo necessário;
- atenção especial deve ser dada às fundações;
- deve ser verificada a existência de blocos ou estruturas iguais ou análogas, selecionando bloco representativo do grupo;
- os instrumentos e os sistemas de medição escolhidos devem ser os que interfiram o mínimo possível com as atividades de construção;
- a localização dos instrumentos deve aproveitar ao máximo as instalações e sistemas existentes como drenagem, galerias, poços, dutos, etc.;
- a medição de deslocamento relativo entre blocos deve estar presente em todas as juntas e medição de subpressão em blocos alternados;
- para a escolha do tipo de instrumento devem ser considerados aspectos de sensibilidade e campo de medição, confiabilidade, custo de aquisição, instalação e operação, durabilidade e resistência;
- devem ser preferidos os instrumentos de leitura direta e sistemas simples de funcionamento e manutenção já conhecidos e experimentados, disponíveis em fábricas, com assistência técnica ou que possam ser

fabricados no próprio canteiro;

- em cada estrutura ou trecho, os blocos mais importantes por sua altura, localização e condições especiais devem ser escolhidos como blocos-chave, onde porção massiva de tipos de instrumentação devem ser instalados.

O mesmo autor também indica critérios para seleção de tais blocos-chave:

- bloco típico para cada trecho de 300 m de extensão e para caracterizar trecho de maior altura;
- blocos localizados em locais singulares como interface entre diferentes tipos de estruturas, mudança de direção do eixo, etc.;
- blocos com fundações desconfiadas devido a grandes escavações e /ou taludes altos laterais ou a jusante;
- blocos com fundações afetadas por feições pouco resistentes e de alta deformabilidade ou com tratamentos especiais.

Conforme CHOQUET (2000), cada instrumento, por sua vez, pode ser elaborado a partir de princípio ou sistemas diferentes de medição. No item a seguir, serão apresentados estes sistemas de medição utilizados.

2.1.5 Principais Tipos de Sistemas de Medição para Instrumentação de Barragens Disponíveis Atualmente

Atualmente, estão disponíveis e utilizados diversos sistemas de instrumentação de barragens, podendo ser destacados:

- sistema de medição por princípio elétrico, como por exemplo o tipo Carlson (ROSSO e PIASENTIM, 1996);
- sistema de medição por corda vibrante (MUSSI et al. 1999);
- sistema de instrumentação por medição topográfica e ou geodésica (DONGJIE et al. 1999);
- sistema de instrumentação por medição direta (CBGB, 1996);

- sistema de instrumentação por fibra ótica (AUFLEGER et al. 1999).

Os sistemas de instrumentação por medição direta são baseados em leituras diretas dos fenômenos físicos, como: medição da variação de nível de água de reservatório utilizando régua marcada em determinado ponto; medição de variação na abertura de fissuras utilizando régua, micrômetro ou fissurômetro, medição da variação de nível de água em piezômetro de tubo aberto ou Casagrande, utilizando trena ou manômetro, etc... (CBGB, 1996).

Os sistemas de medição topográficos ou geodésicos também derivam da medição direta dos fenômenos, porém utilizam ferramentas topográficas e geodésicas, como teodolitos e GPS, entre outros (DONGJIE et al. 1999).

A seguir, se descreve com mais detalhes os demais sistemas, cuja medição é indireta utilizando princípios diversos para correlacionar as grandezas físicas.

2.1.5.1 Sistema de instrumentação por princípio elétrico

Conforme GLOBALSPEC (2002), os aparelhos elétricos correlacionam sinais elétricos à grandezas físicas. Como exemplo do princípio de funcionamento elétrico, o mesmo autor, cita sistema descrito como LVDT (Transformador Diferencial de Variável Linear) que consiste de uma série de indutores em uma haste cilíndrica oca e um núcleo cilíndrico sólido. O sensor produz um sinal elétrico de saída proporcional à posição do núcleo. Pode ser usado em muitos tipos diferentes de dispositivos de medidas que precisam converter variações de posições físicas em sinais elétricos de saída.

O sensor é construído com dois cilindros secundários postos simetricamente no mesmo lado de um cilindro primário, o qual contém um cilindro de cavidade oca. O movimento do núcleo magnético gera uma indutância mútua de cada cilindro secundário que varia relativamente ao primário, de modo que a voltagem relativa induzida do cilindro primário para o secundário também variará. Logo, pode ser calibrado pela variação da posição do núcleo, medindo-se as voltagens de saída

correspondentes. A curva de calibração ou a constante de calibração pode ser determinada e aplicada para que se obtenha a relação com o fenômeno físico a ser medido (GLOBALSPEC, 2002).

CBGB (1996), destaca que os sensores elétricos tipo Carlson foram usados intensivamente nas barragens brasileiras entre as décadas de 70 e 90.

Cita-se como exemplo da aplicação de instrumentos elétricos em barragens de CCR a utilização na barragem de derivação do Rio Jordão (LEVIS et al. 1999).

2.1.5.2 Sistema de instrumentação por princípio de corda vibrante

Conforme JUNEAU e CHOQUET (2002), sistemas de medição de Corda Vibrante (*Vibrating Wire*) têm como princípio de operação do sensor o cálculo de um parâmetro físico pela medição da mudança na frequência de uma corda vibrante, estendida num corpo de uma estrutura que se deforma com ou pela quantidade a ser medida. Um determinado comprimento de corda de aço resistente à alta tensão é firmemente preso em suas pontas, assim ela estará livre para vibrar em sua frequência natural. Como uma corda de violão, a frequência de vibração varia com a tensão na corda e com o movimento relativo entre os dois blocos. A corda possui uma bobina elétrica colocada em seu ponto médio.

A vibração na corda induz na bobina de arranque uma corrente alternada de frequência idêntica à frequência de vibração da corda. O sinal da frequência pode ser transmitido ao longo de cabos condutores e visualizado por um leitor portátil ou monitorado por um sistema de aquisição de dados. Segundo o mesmo autor, estes instrumentos são particularmente conhecidos por dar uma performance superior em aplicações geotécnicas, onde a credibilidade para um longo período e a imunidade do sinal a interferências elétricas é de importância primordial.

Pode ser citado como exemplo da aplicação de instrumentos de corda vibrante em barragens de CCR, a utilização na barragem de UHE Salto Caxias (MUSSI et al. 1999)

2.1.5.3 Sistema de instrumentação utilizando fibra ótica

Os sensores de instrumentação por fibra ótica buscam utilizar ao máximo as propriedades da fibra ótica para efetuar medições de grandezas físicas (ANSARI, 1997). A medição é feita de diferentes maneiras, porém de uma forma geral se utilizam do princípio das fibras óticas permitirem o deslocamento de feixes de luz (WATLEY e JOHANSSON, 2005).

Conforme CLARK (2001), inicialmente a instrumentação por fibra ótica era utilizada apenas em laminados da indústria aeroespacial, sendo posteriormente transferidos com sucesso para o monitoramento da segurança de estruturas civis.

A tecnologia de medição da temperatura por fibra ótica foi apresentada pela primeira vez em 1981 na Universidade de Southampton (AUFLEGER et al., 1999).

Conforme CHOQUET et al. (2000), a instrumentação por fibra ótica tem oferecido excelente vantagem em comparação com sistemas tradicionais. Dentre elas o tamanho reduzido, a não-condutividade, a resposta rápida, resistência à corrosão, a imunidade contra interferências eletromagnéticas e frequências de rádio, eliminando a necessidade de custos com acessórios de proteção contra descargas elétricas e outras interferências. Conforme o mesmo autor, outra característica é que a medição por fibra ótica utiliza técnica altamente sensível possibilitando medições precisas, absolutas e perfeitamente lineares sem a necessidade de meios de estabilização.

Conforme INAUDI e GLISIC (2005) a possibilidade exclusiva da fibra ótica frente a instrumentos convencionais de se medir temperatura e deformação de milhares de pontos ao longo de uma única fibra é ferramenta fundamental para monitoramento de grandes estruturas, tais quais, oleodutos, barragens, entre outros.

KUKUREKA et al. (2005) citam a longa durabilidade de fibras óticas como outra característica importante deste sistema de instrumentação. Segundo o autor, testes foram efetuados em fibras comuns e em fibras marcadas em ambientes úmidos e secos (umidade relativa do ar de 40 a 80%). Estes testes visaram reproduzir a fadiga dinâmica e estática da aplicação em um túnel de 4,5 m e 2,095 m de raio. Como

resultado, obteve-se que mesmo sob ação constante da mais alta tensão de projeto, a durabilidade da fibra modelada pela distribuição Weibull, foi de cerca de 10×10^{38} anos e $9,5 \times 10^{31}$ anos, para túnel com raio 4,5 e 2,095m, respectivamente, (KUKUREKA et al. 2005).

Não obstante, neste sistema de instrumentação as fibras ficam inseridas em cabos revestidos para proteção contra a umidade, esmagamento, fraturamento e estiramento (INAUDI e GLICIC, 2005).

Conforme os mesmos autores uma fibra comum de telecomunicação pode ser utilizada em temperaturas de -20°C a $+60^{\circ}\text{C}$, sendo que, quando inserida em cabos revestidos especiais a faixa de leitura é ampliada para -180°C a $+300^{\circ}\text{C}$.

Este tipo de sistema de instrumentação, que é parte do escopo do presente trabalho, será tratado de maneira específica no capítulo seguinte.

2.2 INSTRUMENTAÇÃO POR FIBRA ÓTICA

2.2.1 Classificação dos Sensores de Fibra Ótica

Conforme ANSARI (1997), um número enorme de tipos de sensores de fibra ótica tem sido desenvolvido em um pequeno período de tempo, na busca de utilizar o máximo possível das suas propriedades para as medições. Por esta razão os sensores de fibra ótica têm sido classificados de diferentes maneiras (ANSARI, 1997).

2.2.1.1 Classificação dos sensores de fibra ótica segundo o princípio de medição

WATKINS (2003) classifica os sensores em duas macro-categorias: os extrínsecos e os intrínsecos, conforme descrito nos itens abaixo.

2.2.1.1.1 Sensores intrínsecos

Os sensores ditos intrínsecos são os que o ponto de medida ocorre dentro da fibra ótica propriamente dita. Uma medição intrínseca também pode ser formada pela incorporação parcial das interfaces de reflexão ao longo da fibra (WATKINS, 2003).

2.2.1.1.2 Sensores extrínsecos

Os sensores ditos extrínsecos baseiam-se no princípio de que o ponto de medida ou o sensor ocorre fora da fibra ótica, cabendo a fibra apenas a tarefa de transmissão os dados pela condução ótica (WATKINS, 2003).

2.2.1.2 Classificação dos sensores de fibra ótica segundo a aplicação

ANSARI (1997), por sua vez, destaca a classificação baseada na aplicação. Segundo o mesmo autor na classificação conforme a aplicação, podem ser divididos em localizados, multiplexados e distribuídos, conforme descrito nos itens abaixo..

2.2.1.2.1 Sensores localizados

Os sensores de fibra ótica localizados determinam uma medição sobre um segmento específico da fibra ótica, sendo que se assemelham, em abrangência, portanto, sensores convencionais de deformação e temperatura.

2.2.1.2.2 Sensores multiplexados

Os sensores multiplexados são usualmente construídos pela combinação de um número individual de sensores para medir perturbações sobre uma estrutura como um todo.

2.2.1.2.3 Sensores distribuídos

Sensores distribuídos fazem uso pleno da fibra ótica, uma vez que cada elemento de fibra ótica é utilizado tanto com o propósito de medir como de transmitir o dado.

2.2.1.3 Classificação dos sensores de fibra ótica segundo a transdução

ANSARI (1997) destaca a classificação baseada na transdução. A classificação baseada no mecanismo de transdução é categorizada em sensores tipo intensidade, espectrométricos e tipo fase, conforme descrito nos itens abaixo.

2.2.1.3.1 Sensores tipo intensidade

Os sensores baseados na intensidade da modulação correlacionam-se com as perdas de intensidade de luz associadas com o tensionamento da fibra ótica ao longo de todo o seu comprimento. Normalmente sensores que utilizam esta característica na medição são sensores ditos de intensidade ou amplitude térmicas.

2.2.1.3.2 Sensores Espectrométricos

Os sensores espectrométricos, por sua vez, têm seus mecanismos de transdução baseados na relação de mudanças no comprimento da onda de luz com a característica a se medir, por exemplo, deformação. Um exemplo deste tipo de sensor é o sensor baseado nas redes de Bragg (ANSARI, 1997).

2.2.1.3.3 Sensores tipo fase

Segundo ANSARI (1997), os sensores de fase cobrem uma extensa faixa de fenômenos óticos aplicados a monitoramento de fenômenos físicos. Dentre os sensores de fase podem ser destacados os sensores interferométricos e os polarimétricos.

a) Sensores tipo fase interferométricos

Os sensores interferométricos podem ser aplicados para medir a mudança da fase da luz em um número de diferentes configurações. Estes sensores captam a interferência da luz de dois tramos de fibras óticas idênticas, uma com o princípio de servir como referência e outra como sensor. São altamente sensíveis à medição de deformação. Uma exceção ao sensor interferométrico de dois tramos é o sensor de fibra única Fabry-Perot, onde a fibra é manipulada de tal forma a formar dois espelhos refletores perpendiculares ao eixo da mesma (ANSARI, 1997). Conforme CHOQUET et al. (2000) nesta classe se enquadram os sensores interferométricos extrínsecos Fabry-Perot.

b) Sensores tipo fase polarimétricos

Segundo ANSARI (1997), os sensores polarimétricos utilizam as características de polarização da luz para a transdução. A sensibilidade de sensores polarimétricos depende das características de polarização da fibra. Este tipo de sensor oferece sensibilidade e simplicidade equivalente ao sensor interferométrico, tendo como vantagem a utilização de uma única fibra (ANSARI, 1997).

Destaca-se nesta classificação como exemplo o sensor polarimétrico proposto por CHEN (2004) para medição de pressão neutra.

2.2.1.4 Sensores especiais

De maneira complementar, cita-se que existem vários sensores especiais que não se enquadram nas classes anteriores. Como exemplo, pode se citar os sensores especiais apresentados por CLARK et al. (2001), os quais classificam também a existência de sensores químicos de rede de período longo, também ditos sensores de ondas evanescentes, os quais utilizam redes de difração de longo período incorporadas dentro das fibras óticas. Estes sensores diferem dos demais, pois, sendo cobertos por

um polímero compatível, podem detectar reações químicas. As reações são detectadas pela diferença de refração observada conforme a alteração química do ambiente onde o sensor está inserido (CLARK et al., 2001).

Por fim, destaca-se que as informações apresentadas pela bibliografia estudada indicam que há um campo vasto e em constante evolução para diversificação dos tipos de sensores de fibra ótica, tal qual o apresentado por MICHIE (1997). No trabalho deste autor, é apresentado um sensor de fibra ótica Reflectométrico Time Domain (OTDR) onde, também, é proposto monitoramento do potencial de penetração de água e a presença de vazios no concreto através do uso de fibra aderida a uma camada de determinado polímero expansivo na presença de umidade.

2.2.2 Principais Tipos de Sensores de Fibra Ótica Utilizados em Instrumentação de Estruturas Cíveis de Concreto

Conforme a bibliografia consultada, a maioria da instrumentação de estruturas cíveis utilizando fibra ótica é feita, utilizando:

- a) sensores de fibra ótica extrínsecos localizados interferométrico de Fabry-Perot (CHOQUET et al., 2000);
- b) sensores de fibra ótica intrínsecos localizados espectrométricos, utilizando redes de Bragg (POLOSSO, 2001);
- c) sensores de fibra ótica intrínsecos distribuídos de amplitude para medição de temperatura e percolação pelo método Raman (AUFLEGER et al., 2005);
- d) sensores de fibra ótica intrínsecos distribuídos de amplitude para medição de deformação pelo método Brillouin (WATLEY e JOHANSSON, 2005).

2.2.2.1 Sensores de fibra ótica extrínsecos localizados interferométricos de Fabry-Perot

2.2.2.1.1 Princípio de funcionamento dos sensores Fabry Perot

Segundo CLARK (2001), este tipo de sensor monitora a interferência entre a reflexão Fresnel do final da fibra ótica e a superfície reflexiva externa, sendo versáteis, pois refletores externos podem tornar-se sensíveis a medição de algumas propriedades da estrutura.

Segundo CHOQUET (2000), existem várias formas de projetar sensores extrínsecos interferométricos Fabry Perot (EFPI), porém basicamente o funcionamento deste tipo de sensor baseia-se na manipulação da fibra de tal forma que se formem dois refletores paralelos, que funcionam como espelhos, perpendiculares ao eixo da fibra.

Uma desvantagem notada na aplicação em barragens é que cada sensor tem um cabo individual (CHOQUET et al.1999), este fato deriva de que, segundo ANSARI (1997), a interferência dos sinais refletidos que se formam naquela cavidade pelos dois espelhos parciais criam o sentido da interferência, que por esta razão só são capazes de prover medições localizadas na cavidade formada pelos dois espelhos.

2.2.2.1.2 Aplicação de sensores Fabry Perot em instrumentação de barragens

Conforme CHOQUET et al. (2000), o sensor EFPI é um sensor bastante utilizado na medição de características do concreto, principalmente, pela precisão na mensuração da deformação.

GLISIC (1999) comenta várias aplicações em estruturas civis, destacando que a aplicação pioneira em barragens foi na barragem de concreto em arco de Emosson, na Suíça em 1996, onde foram instalados dois extensômetros de fundação, utilizando sensor de fibra ótica extrínseco interferômetro Fabry-Perot e cujas leituras foram comparadas com extensômetros convencionais de haste instalados em paralelo.

Conforme o mesmo autor, do comparativo, pode se comprovar que, descartado o período inicial de relaxação das partes plásticas de um dos sensores, os dois extensômetros apresentaram leitura idênticas, tendo o extensômetro de fibra ótica apresentado tempo de resposta mais rápido que o convencional de haste, quando da variação de níveis de água (GLISIC, 1999).

2.2.2.2 Sensores de fibra ótica intrínsecos localizados espectrométricos utilizando redes de Bragg

2.2.2.2.1 Princípio de funcionamento dos sensores Redes de Bragg

Conforme ANSARI (1997), inicialmente sensores de fibra ótica utilizando redes de Bragg foram desenvolvidos como filtros de frequência para sistemas de telecomunicação óticos. Segundo SLOWIK et al. (1998), a primeira experiência produziu fibras com redes de Bragg aplicando uma série de linhas equidistantes dentro de uma amostra de vidro de uma fibra de telecomunicação monomodo padrão utilizando laser. Segundo o mesmo autor, estas linhas que compreendem as redes de Bragg são caracterizadas por um índice de reflexão de uma amostra regular de fibra. A propagação da luz na amostra de vidro da fibra é refletida pelas interfaces entre as regiões que possuem diferentes índices de reflexão.

Pela comparação entre os picos do comprimento de onda que depende do espaçamento entre as linhas formadas, pode-se obter medições de deformação, pois se a fibra é esticada o comprimento de onda Bragg aumenta. Por estas características, o interesse pela utilização de sensores utilizando fibras marcadas com redes de Bragg (FBG), cresceu rapidamente e várias estruturas foram instrumentadas com sensores de deformação (SLOWIK et al., 1998). Os sensores de fibra ótica utilizando redes de Bragg permitem a aplicação de diferentes sensores em série em uma mesma fibra, tornando possível transformá-lo em um sistema multiplexado (RAN et al., 2005).

2.2.2.2.2 Aplicação de sensores Redes de Bragg em instrumentação de barragens

Apesar de todas as referências citadas não foi encontrado, na bibliografia consultada, registro da aplicação de sensores a redes de Bragg em barragens.

Conforme DAVIS et al. (1997) e POLOSSO (2001), pode se afirmar que os sensores baseados nas redes de Bragg são bastante utilizados na instrumentação de estruturas de concreto.

Os sensores redes de Bragg permitem monitoramento de diversas características de estruturas de concreto (ANSARI, 1997).

Segundo CHOQUET (2000), utilizando-se sensores FBG embutidos ou aplicados superficialmente ao concreto pode se medir continuamente as condições de danos, deformação, tensão, formação de fissuras, pressão intersticial e temperatura.

Como aplicação em concreto massa pode se destacar o exposto por WANG et al. (2005), registrando a aplicação de 237 sensores de fibra ótica para medição de temperatura e de deformação utilizando redes de Bragg no concreto massa da ponte Nanjing 3rd Yangtze, sobre rio Yangtze na China.

ANSARI (1997) apresenta também a possibilidade de se medir o teor de ar incorporado do concreto com este tipo de sensor.

POLOSSO (2001) apresenta resultados da aplicação deste sensor na detecção de corrosão em concreto armado.

YEO et al. (2005) utiliza este sensor para detectar a penetração de água e porosidade do concreto.

Podem ser citadas várias aplicações de sensores de fibra ótica utilizando redes de Bragg em estruturas de concreto, como por exemplo, a aplicação descrita por MICHIE (1997) na detecção de degradação do concreto, a descrita por SLOWIK (1998) quanto à verificação da retração plástica. GLISIK (1999) analisa o comportamento do concreto nas idades iniciais, WATKINS (2003) aplica os sensores de fibra ótica para medir deformações em pontes de concreto. KUKUREKA et al. (2005), utilizaram sensores FBG no monitoramento de deslocamento de um túnel.

2.2.2.3 Sensores de fibra ótica intrínsecos distribuídos de amplitude para medição de deformação pelo método Brillouin

2.2.2.3.1 Princípio de funcionamento dos sensores distribuídos Brillouin

Como já classificado por ANSARI (1997) para o método distribuído, para estes a fibra toda acaba sendo sensor, permitindo a medição em todo o seu comprimento.

Este tipo de sensor deriva da aplicação da Reflexão Brillouin estimulada na fibra ótica, conhecida pela sigla SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*), permitindo medir a temperatura e deformação de maneira distribuída (BERNINI et al., 2005).

Conforme citado por WATLEY e JOHANSSON (2005), sensores distribuídos de fibra ótica tipo Brillouin tiram proveito de que as características da frequência Brillouin do espectro de luz do laser refletido, quando percorrem a fibra ótica, variam com a temperatura e deformação.

Uma característica típica de medições utilizando princípio de Brillouin é que as medições de temperatura se sobrepõem as de deformação (GROSSWIG et al., 2005)

Segundo PARKER et al.(1997), este efeito de sobreposição da temperatura e deformação é conhecido como sensibilidade cruzada. Segundo o mesmo autor, para obter apenas o efeito da deformação ou da temperatura isoladamente se faz necessário levar em conta não apenas a frequência Brillouin, mas também o energia Brillouin que atua em cada ponto da fibra.

Segundo WATLEY e JOHANSSON (2005), o instrumento de medição normalmente utiliza um laser para aplicar pulsos de luz dentro da fibra, e que um detector específico para a frequência e energia Brillouin mede a reflexão desta luz, como um pulso de luz se deslocando ao longo seu comprimento e correlaciona esta leitura com temperatura e deformação. Conforme o mesmo autor este equipamento é conhecido como DTSS (*Distributed Temperature and Strain Sensor*).

Para a medição de temperatura o método Brillouin tem menor resolução de temperatura e menor resolução espacial que o método Raman, apresentado no item 2.2.2.4, todavia diferentemente deste permite medições em comprimento maiores que 10 km (GROSSWIG et al. 2005). Segundo o mesmo autor a medição de deformação é o grande diferencial deste método.

Diversos estudos estão em andamento para tornar mais precisa a resolução espacial do método na medição da temperatura e deformação (ZOU et al., 2005a).

Este método vem sendo bastante utilizado para monitorar estruturas com grande comprimento (GLISIC e INAUDI, 2005), sendo utilizado sistematicamente para monitoramento de oleodutos, gasodutos, etc... (ZOU et al. 2005b).

2.2.2.3.2 Aplicação de sensores distribuídos Brillouin em instrumentação de barragens

A primeira aplicação em barragens observada na bibliografia consultada foi em Setembro de 2004 na barragem de terra de Vattenfall Vattenkrafts Ajaure Dam na Suécia (WATLEY e JOHANSSON, 2005). Conforme os mesmos autores, nesta barragem foram instalados 1122m de cabos de fibra ótica distribuídos em dois níveis da altura da barragem durante o período construtivo, assim como para comparação foram instalados três sensores convencionais.

Segundo WATLEY e JOHANSSON (2005), foi possível detectar movimentos de 5 mm na barragem a cada metro de cabo instalado, assim como os resultados obtidos foram compatíveis com os sensores convencionais instalados e mostraram coerência com a variação de nível do reservatório.

INAUDI e GLISIC (2005) mencionam a utilização também em uma barragem na Letônia.

Registra-se a utilização com sucesso deste tipo de instrumentação distribuída em monitoramento de oleodutos, gasodutos e sistemas de transporte de produtos químicos (GROSSWIG et al.2005; INAUDI e GLISIC, 2005).

2.2.2.4 Sensores de fibra ótica intrínsecos distribuídos de amplitude para medição de temperatura e percolação pelo método Raman

2.2.2.4.1 Princípio de funcionamento dos sensores distribuídos Raman

O método distribuído de medição de temperatura utilizando fibra ótica, também conhecido pela sigla DFOT (*Distributed Fibre Optic Temperature Measurement*), conforme AUFLEGER et al. (2005), baseia-se no fato de que, ao aplicar um feixe de luz em uma fibra de telecomunicação comum, os fótons interagem com as moléculas da fibra, refletindo sinais (GROSSWIG et al. 2005).

A faixa de sinais refletidos é correlacionada com a temperatura e pode ser extraído por análise de frequência, sendo que a distância do ponto de medição até a fonte emissora de luz pode ser obtido pelo tempo de resposta (AUFLEGER et al. 2005).

Segundo WATLEY e JOHANSSON (2005), o instrumento de medição normalmente utiliza um laser para aplicar pulsos de luz dentro da fibra. Um detector específico para a frequência Raman mede a reflexão desta luz, como um pulso de luz se deslocando ao longo de seu comprimento. Conforme o mesmo autor este equipamento é conhecido como DTS (*Distributed Temperature Sensor*).

Segundo AUFLEGER et al. (2005) os valores medidos podem permitir a avaliação da temperatura com precisão de 0,2°C e resolução espacial de 0,25m para um comprimento de até 5 km de fibra. Segundo o mesmo autor, a tecnologia do método DFOT tem sido utilizada com sucesso para medição de temperatura no maciço das barragens de concreto.

O método Raman é mais preciso na determinação da temperatura e tem maior resolução espacial que o método Brillouin (GROSSWIG et al., 2005).

Conforme AUFLEGER et al. (2005), para a detecção da temperatura pelo método DFOT a leitura é direta, sendo obtido para cada trecho da fibra a temperatura

referente ao concreto que a envolve. Segundo o mesmo autor a medição de temperatura também pode ser usada para a detecção de percolação em barragens de modo geral. Para a detecção da percolação, por correlação com a medição de temperatura, propiciada pelo método DFOT, podem ser utilizados o método do gradiente e o método com aquecimento, sendo que:

- Método do Gradiente (*Gradient Method*): no método do gradiente, a temperatura é um rastreador para detectar anomalias no campo de fluxo (AUFLEGER et al. 2005). O método do gradiente segundo WATLEY e JOHANSSON (2005), é utilizado baseando-se no fato de que ocorrem variações sazonais de temperatura da água em lagos, reservatórios e rios causando mudanças na temperatura da água percolada através da barragem durante o ano. A grandeza da percolação, portanto pode ser detectada pela diferença de temperatura dentro do maciço. Como uma temperatura constante indica baixa percolação e uma temperatura variando significativamente no tempo, indica percolação significativa (WATLEY & JOHANSSON, 2005). Segundo AUFLEGER et al. (2005), uma limitação deste método é que requer a presença de diferença de temperatura entre as superfícies externas, especialmente a temperatura do reservatório, e a de envolvimento dos cabos. Quando esta situação não existe, o método do gradiente não é aplicável e deve ser utilizado o método do aquecimento. Segundo WATLEY e JOHANSSON (2005) utilizando-se este método a partir de 2.300m de fibras instaladas na Hylte Dam na Suécia em 2002, não apenas foi possível detectar pequenas percolações, como, pelo modelo de cálculo de vazão, foi possível estimar a faixa esperada de vazão percolante.
- Método com aquecimento (*Heat-up Method*): conforme AUFLEGER et al. (2005), com a aplicação deste método se detecta a presença e a movimentação da água pela avaliação da resposta térmica após a indução

de temperatura externa quando aplicada uma voltagem elétrica em cabos de cobre previamente inseridos dentro do cabo em paralelo com a fibra ótica. Segundo o mesmo autor, o aumento de temperatura no cabo é influenciado pelas propriedades térmicas da região que o envolve. Quando o cabo está em contato com regiões de baixa condutividade térmica, como no caso de materiais secos, irá propiciar um aumento maior da temperatura, enquanto que regiões de alta condutividade térmica, como no caso de materiais úmidos, a evolução é menor. Este princípio, portanto, permite detectar a presença ou não de umidade na região onde o cabo está inserido. Na Figura 3, abaixo, é apresentado um esquema típico de instalação dos cabos para medição de percolação em barragens de terra ou enrocamento com núcleo de argila e para medição da temperatura de hidratação em barragens de concreto utilizando o método DFOT.

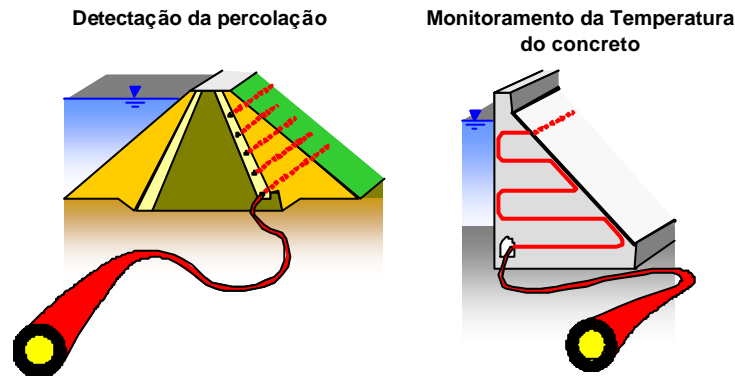


FIGURA 3- ESQUEMA DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DISTRIBUÍDO PARA DETECTAR PERCOLAÇÃO E TEMPERATURA (AUFLEGER ET.AL, 2005)

2.2.2.4.2 Aplicação de sensores distribuídos Raman em instrumentação de estruturas civis

A primeira aplicação da instrumentação por fibra ótica em barragens de concreto, conforme AUFLEGER et al. (2003), foi o uso do método distribuído de medição da temperatura na barragem de Myagase no Japão em 1991, descrita por KOGA et al. (2005).

A partir de então a tecnologia já foi usada em diversas barragens na última década. Com base na bibliografia consultada podem ser citadas:

- as barragens de Bireck Dam na Turquia (1997), Shimenzhi Dam na China (2000), Wala Dam e Mujib Dam na Jordânia (2001) AUFLEGER et al. (2005);
- as barragens de Loeven (1998), Saedva (1999), Aitik (2000), Ajaure (2001), Vargfors (2001), Hylte (2002), Suorva West (2003), Suorva East and Sagvidammen (2004), Bastusel (2004) e Gallejure (2004) na Suécia (WATLEY & JOHANSSON, 2005).

As barragens citadas, conforme a bibliografia de referência anterior, foram construídas de diversos materiais:

- concreto massa;
- concreto compactado com rolo;
- terra e,
- enrocamento.

Destaca-se que na bibliografia consultada pode-se verificar também a aplicação em canais (AUFLEGER et al., 2005).

No item a seguir serão apresentadas as aplicações de sensores distribuídos tipo Raman, os únicos aplicados em barragens de CCR, conforme a bibliografia consultada.

2.3 APLICAÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO POR FIBRA ÓTICA EM BARRAGENS DE CCR

Da bibliografia consultada, apenas AUFLEGER et al. (2003) registra a aplicação em barragens de CCR de instrumentação por fibra ótica.

Conforme o autor, a aplicação no ano 2000 da instrumentação por fibra ótica na Barragem Shimenzhi Dam na China foi a pioneira na utilização em uma barragem de CCR em arco gravidade. No período entre 2000 e 2002 foi aplicada a instrumentação por fibra ótica para medição de temperatura nas barragens a gravidade em CCR de Wala e Mujib na Jordânia (AUFLEGER et al., 2003).

A seguir, apresenta-se mais detalhes sobre a aplicação da instrumentação por fibra ótica nas obras citadas.

2.3.1 Barragem em Arco Shimenzhi, China

Conforme AUFLEGER et al. (2003), a barragem em arco Shimenzi está localizada perto de Urumqi, na região autônoma de Xinjiang Uygur, noroeste da China. A barragem é em arco multicentrado e foi concluída em 2001, com uma altura final de 109 m e comprimento de 220 m. É a segunda represa de CCR em arco mais alta do mundo, atrás da represa em Arco de Shapai, perto de Chengdu, China. A represa Shimenzhi é uma estrutura muito esbelta com aproximadamente 30 m de largura na base e 15 m no centro, exposta a extremas diferenças de temperatura causadas pelo clima continental chinês (30°C no verão e -20°C no inverno).

Devido a essa considerável variação de temperatura, a estrutura apresentava potencial para surgimento de fissuras da estrutura, sendo o controle da temperatura do CCR, durante a construção, um item importante para evitá-las. A parte principal da barragem foi construída com CCR, cuja dosagem foi feita com 62 kg/m³ de cimento e 110 kg/m³ de cinza volante.

Destaca-se que nesta obra o fato de ter sido usado pozolana em adição ao cimento Portland já demonstra a preocupação com o efeito térmico e o risco de

fissuração, pois, conforme PEREIRA e KUPERMANN (2002) a utilização deste tipo de cimento mostrou-se eficiente na minimização dos efeitos de geração do calor de hidratação.

Conforme citam AUFLEGER et al. (2003), para a obra em questão, foi utilizado nas faces da barragem, concreto convencional com consumo de 93 kg/m³ de cimento, 110 kg/m³ de cinza volante e óxido de magnésio como aditivo para compensar a retração, favorecendo a barreira impermeabilizante e também aumentando a resistência ao congelamento,.

Segundo o mesmo autor, a barragem tem apenas uma junta transversal no centro do arco e pequenas juntas adicionais em locais especiais e, para prevenir que diferenças entre gradientes de temperatura gerem o risco de fissura, as faces da barragem que ficaram expostas foram cobertas com uma manta isolante.

Esta solução de cobrir as faces expostas da barragem indica preocupação com o desenvolvimento das tensões térmicas, conforme MEHTA e MONTEIRO (1994), o isolamento superficial tem como finalidade regular a taxa de queda de temperatura, de modo que as diferenças nas tensões, devidas a altos gradientes de temperatura entre a superfície do concreto e o seu interior sejam reduzidos.

Esta preocupação levou à instalação entre maio e agosto de 2000, de, aproximadamente, 300 m de fibras óticas, motivada pelos resultados iniciais observados de evolução de temperatura (AUFLEGER et al., 2003). Conforme o mesmo autor, foi escolhido um cabo com alta resistência à tração e à compressão, permitindo o tráfego sobre o mesmo durante a instalação de modo que todo o processo foi feito sem causar atraso no cronograma.

A preocupação em registrar se o método está ou não atrapalhando a alta produção do CCR se justifica, pois, conforme MARQUES FILHO (2005), a alta produção é uma das características que induziram à utilização de CCR em barragens. Conforme AUFLEGER et al. (2003) a utilização de sensores de fibras óticas nas barragens descritas resultou em um monitoramento dos gradientes distribuídos de

temperatura abrangente e preciso, que permitiu conclusões seguras em termos de restrições internas ou autogêneses. Como parte do desenvolvimento espacial da temperatura durante a construção e operação da barragem, o calor de hidratação também foi determinado através de ensaios de laboratório, oferecendo um panorama dos fenômenos termogênicos do concreto na barragem.

Este acompanhamento, mais preciso e apurado, da distribuição de temperatura no concreto contribuiu para melhor entendimento da evolução das propriedades do concreto na barragem e, como consequência, o conhecimento adquirido das propriedades do concreto permitiu tomar ações de prevenção em regiões sujeitas a fissuras, como no caso de isolamento térmico à jusante da barragem no inverno (AUFLEGER et al., 2003).

Esta melhoria é de especial interesse em uma estrutura de concreto massa, tal qual o é numa barragem de concreto com rolo, pois o volume é de tal grandeza que a preocupação com a temperatura requer meios especiais para combater a geração de calor e posterior mudança de volume (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Conforme AUFLEGER et al. (2003), o desenvolvimento das propriedades do concreto durante os primeiros dias depois do seu lançamento é um tópico complexo e as tensões de indução térmica são altamente variadas dentro da estrutura. Primeiramente, tensões de compressão aparecem devido à expansão induzida térmica de volume, com deformação restrita que começa em parte relacionada devido ao baixo módulo de elasticidade inicial, depois que a temperatura máxima é excedida, um pequeno decréscimo de temperatura é suficiente para compensar a tensão de compressão, dado agora ao muito alto módulo de elasticidade. O referido autor define que a temperatura que causa o estágio de ausência de tensões é chamada de temperatura de tensão zero.

Segundo registra AUFLEGER et al. (2003) o melhor conhecimento da evolução de temperatura na barragem, propiciado pela instrumentação por fibra ótica, tornou mais confiável o monitoramento do risco de fissuras. Caso não houvessem sido

tomadas medidas, um posterior decréscimo de temperatura geraria tensões de tração, podendo exceder a tensão de tração do concreto podendo gerar com o aumento da temperatura de tensão zero do concreto e o decréscimo de temperatura para a temperatura ambiente média haveria o aumento de potencial resultante de fissuras térmicas induzidas (AUFLEGER et al., 2003).

Desta forma, pode-se concluir que a melhoria propiciada pela instalação da instrumentação por fibra ótica foi muito importante, pois o monitoramento mais efetivo da temperatura das barragens de CCR evitou a formação de fissuras neste empreendimento (AUFLEGER et al. 2003).

AUFLEGER et al. (2003), também registrou que, dependendo da distribuição espacial e do tempo de desenvolvimento da temperatura de tensão zero e da temperatura atual do concreto, foi verificado que as tensões foram muito variáveis no corpo da barragem sendo que as características sempre se comportaram sob diferentes parâmetros e condições de contorno como: propriedades mecânicas do concreto, geometria da barragem, espaçamento de juntas, velocidade da construção e condições ambientais e métodos de construção e tratamento.

Esta heterogeneidade das propriedades do CCR no maciço também é confirmada por MARQUES FILHO (2005) onde cita que o CCR depende de uma série de atividades concatenadas complexas, com possibilidade de ocorrência de várias não-conformidades.

2.3.2 Barragem à Gravidade Wala, Jordânia

Conforme AUFLEGER et al. (2003), a barragem de Wala é de propriedade da Autoridade do Vale do Jordão, e situa-se em Wadi Wala, cerca de 40 km ao sul de Aman, capital da Jordânia. Ela é considerada uma barragem híbrida, possui uma barragem a gravidade central de CCR e barragens de enrocamento nas ombreiras. A barragem possui uma altura máxima de 52 m, com um volume de 221.000 m³ de CCR. A estrutura de concreto, de cerca de 120 m de comprimento, é subdividida por juntas transversais espaçadas de cerca 15 m. O CCR foi dosado com consumos variando de

100 a 120 kg/m³ de cimento Portland, sem adição de pozolana.

Destaca-se que nesta obra o fato de não ter sido usado pozolana em adição ao cimento Portland já induz ao aumento do risco de fissuração pois conforme PEREIRA e KUPERMANN (2002) a utilização deste tipo de cimento mostrou-se eficiente na minimização dos efeitos de geração do calor de hidratação.

Nesta obra em questão, segundo AUFLEGER et al. (2003), as faces de montante e jusante foram feitas com concreto convencional, com consumo de cimento de 200 kg/m³ e espessura de 0,6 m, em média. A argamassa de ligação entre cada camada de CCR se estende em média 5 m da face de montante e 0,7 m da face de jusante.

Com relação a instrumentação, o mesmo autor destaca que tanto na seção transversal de CCR, como nas seções longitudinal e horizontal da Wala Dam em diferentes níveis, foram escolhidas seções de medição e, a partir de novembro de 2000, foram aplicados, aproximadamente, 2500 m de cabo de fibra ótica até o fim de abril de 2002. Os primeiros resultados das medições, desde o início do projeto até o fim da construção da barragem de CCR, mostraram que a distribuição de temperatura reflete o comportamento térmico típico de uma barragem gravidade de CCR durante a hidratação do concreto e resfriamento da estrutura.

A referência não cita o comportamento térmico visualizado, pode se argüir, pelo exposto em MEHTA e MONTEIRO (1994) que esta barragem está sujeita a um alto risco de fissuração térmica, uma vez que a configuração de dosagem utilizada quanto ao teor de cimento adotado, sem adição de pozolana, indica a potencialização de gradientes térmicos altos.

No tocante a eficácia do método distribuído de medição de temperatura por fibra ótica, AUFLEGER et al. (2003), registra que nesta obra também, a instrumentação por fibra ótica pelo método distribuído Raman, permitiu uma visualização detalhada da distribuição de temperatura e até mesmo de cada gradiente de temperatura. Esta visualização detalhada permitiu uma imediata avaliação do

potencial de surgimento de fissuras térmicas.

A citação desse autor de que dados foram coletados quase continuamente desde a instalação dos primeiros cabos até a data do término do artigo, deduz-se que apesar da visualização detalhada obtida pela instrumentação por fibra ótica, a coleta de dados ainda estava em progresso quando da conclusão do artigo. Esta pode ser a razão do referido autor não citar a ocorrência de risco de atingir o limite de fissuração ou tomada de medida preventiva, como seria de se esperar, vista as configurações de dosagem (MEHTA e MONTEIRO, 1994; PEREIRA e KUPERMANN 2002).

2.3.3 Barragem à Gravidade Mujib, na Jordânia

Conforme AUFLEGER et al. (2003), a barragem de Mujib situa-se no vale do Mujib, cerca de 60 km ao sul de Aman. A represa Mujib também é de propriedade da Autoridade do Vale do Jordão, e é composta por barramento misto, tendo na parte central barragem de CCR do tipo gravidade e barragens de terra nos flancos do vale. A altura máxima chega a, aproximadamente, 60 m e o volume de CCR utilizado foi de 720.000 m³. O CCR foi dosado com 85 kg/m³ de cimento Portland comum, sem adição de pozolana. Nas faces foi utilizado concreto convencional com uma espessura de 0,3 m. Uma membrana de PVC foi utilizada como face de impermeabilização da barragem. A argamassa de ligação entre as camadas de CCR cobria um terço da espessura da barragem na face montante e 2 m na face de jusante. Em paralelo a instalação da instrumentação por fibra para medir temperatura, foram instalados, também, tensômetros para medição das tensões de restrição *in situ*. AUFLEGER et al. (2003).

Destaca-se, conforme ROSSO e PIASENTIM (1996), que os tensômetros tem melhor desempenho que o deformímetros por apresentarem maior confiabilidade para medição de tensões de compressão em valor absoluto.

No tocante a instrumentação da barragem em questão, AUFLEGER et al. (2003), cita que 4.000 m de cabos de fibra ótica foram instalados na barragem, sendo que foram instalados sete tensômetros, em dois níveis, colocados no centro e na face

de jusante.

Segundo o mesmo autor, os dados da instrumentação por fibra ótica foram coletados quase continuamente desde o início da concretagem, assim como dos tensômetros. Com a obtenção das leituras de temperatura dos instrumentos de fibra ótica e de tensão dos tensômetros convencionais, foi possível investigar a relação do desenvolvimento da temperatura e estados de tensões por meio de modelagem numérica.

O autor também cita que os resultados medidos serviram para calibrar análises numéricas, que incluem o desenvolvimento de tensões nas primeiras idades do concreto fornecendo ferramentas para análise do comportamento estrutural dos parâmetros para o projeto, uma vez por meio da utilização dos dados tensômetros e termômetros foi possível obter a temperatura de tensão zero. Sendo que a distribuição de temperatura detalhada pelo sistema de fibras óticas, nesta experiência atreladas ao conhecimento das distribuições de temperaturas de tensão zero, possibilitaram uma distribuição espacial de tensões em uma seção da barragem (AUFLEGER et al., 2003).

2.4 PRINCIPAIS DADOS LEVANTADOS

Da bibliografia consultada, pôde-se notar que dos tipos de instrumentação por fibra ótica mais utilizados em estruturas civis, apenas os sensores distribuídos pelo método Raman foram aplicados em barragens de CCR.

Destas aplicações, pode-se destacar que, conforme AUFLEGER et al. (2003), o método de instrumentação por fibra ótica distribuído Raman, usado para acompanhar a evolução térmica do concreto nas três barragens de CCR analisadas, mostrou maior disponibilidade de dados de temperatura que os instrumentos convencionais. Ainda, devido a isto, nos casos apresentados, foi possível detectar o risco iminente de ser ultrapassado o gradiente térmico limite de fissuração, permitindo ações prévias nos fatores influentes evitando a ocorrência de fissuração térmica (AUFLEGER et al. 2003).

Destaca-se, também, o fato de que a instalação dos cabos de fibra ótica não atrapalhou a produção do lançamento do CCR nas barragens onde foi aplicado (AUFLEGER et al., 2003).

Da bibliografia consultada, pode-se verificar, também, que o método distribuído de medição de deformação, apesar de não ter sido aplicado em barragens de CCR ou mesmo de concreto massa, foi utilizado para medição de deformação em barragens de terra no final de 2004 (WATLEY & JOHANSSON, 2005). Os resultados desta aplicação, apresentada pelo mesmo autor, contudo, não permitiram concluir que, na sua aplicação em barragens de CCR, o benefício seria o mesmo, já que estas últimas apresentam deformações bem menores. Porém, a idéia de se medir de maneira distribuída a deformação interna do maciço é bastante atrativa para estudos futuros, pois possibilitaria um monitoramento efetivo tanto da deformação pelo efeito da termogênia como dos esforços estruturais.

Dos sensores localizados apresentados pela bibliografia, pode se notar que apenas os sensores interferométricos de Fabry-Perot foram utilizados em barragens, mas precisamente como extensômetro de fundação (GLISIC, 1999). Pode se notar, por outro lado, que estes sensores têm abrangência bastante limitada para aplicação em maciços, pois, para cada sensor é necessário um cabo e foram desenvolvidos apenas para medição da deformação (ANSARI, 1997).

Por outro lado, os sensores localizados espectrométricos utilizando redes de Bragg, apesar de não ter sido encontrado registros de uso em barragens, apresentam grande potencial para melhor investigação de diferentes características do maciço, pela possibilidade de medição de tipos de características de estruturas de concreto (ANSARI, 1997). Conforme CHOQUET (2000), utilizando-se sensores de fibras óticas redes de Bragg embutidos ou aplicados superficialmente ao concreto, pode-se medir continuamente as condições de danos, deformação, tensão, formação de fissuras, pressão intersticial e temperatura. ANSARI (1997) apresenta, também, a possibilidade de ser medir o teor de ar incorporado do concreto, POLOSSO (2001) de detecção de

corrosão em concreto armado, MICHIE (1997) de detecção de degradação do concreto, SLOWIK (1998) de verificação da retração plástica e GLISIC (1999) de análise do comportamento do concreto nas idades iniciais.

Esta versatilidade de medições dos sensores redes de Bragg ainda tem como benefício adicional, a possibilidade dos sensores serem ligados em série (RAN et al., 2005), o que permite reduzir o número de cabos no maciço.

3 MÉTODO DE PESQUISA

3.1 ESCOLHA DO MÉTODO

Tendo em vista o exposto no item 2.4, pôde-se concluir que os tipos de instrumentação por fibra ótica que possuíam maior potencial para responder a hipótese da pesquisa eram o método de medição distribuída Raman, por já ter sido aplicado com sucesso em barragens, inclusive barragens de CCR e o método utilizando redes de Bragg, por permitir ligações de sensores em série. O método distribuído Brillouin não foi escolhido por estar ainda em fase de desenvolvimento e o método Fabry Perot pelo fato de só permitir utilização de sensores com cabo individual. Sendo assim foi decidido aprofundar a investigação no sentido de verificar o comportamento dos sensores distribuídos de medição de temperatura Raman e dos sensores localizados utilizando Redes de Bragg em barragens de CCR no Brasil. Para estes últimos foi decidido verificar a possibilidade de utilizar sensores em série. Também, da análise do Capítulo 2, foi adotado como parâmetro de comparação a instrumentação por corda vibrante, já que esta última tem uso consagrado em barragens de CCR no Brasil e no mundo.

Optou-se por testar estes sensores em uma barragem protótipo. Esta decisão baseia-se por duas razões principais:

- a validação no maciço possibilita conhecimento do comportamento em condição real de utilização, diminuindo incertezas ou correções de efeito escala caso fossem feitos em laboratório; e
- a validação no maciço permite conhecer, também, a interação com o método construtivo de barragens de CCR utilizado no Brasil.

Partindo da premissa que ROBSON (1993) apresenta três principais métodos de pesquisa: Estudos de caso, *Survey* e Experimento, procedeu-se a análise crítica de cada um deles, como segue.

3.1.1 Método do Experimento

O Método do Experimento foi descartado para a pesquisa pois na aplicação em uma barragem protótipo, como no caso em questão, não é possível controlar as variáveis que interferem no processo (ROBSON, 1993).

3.1.2 Método da *Survey*

O método da *Survey* que, conforme ROBSON (1993), se refere à coleta de informações em maneira padronizada de uma população específica, também foi descartado, pois tanto a tecnologia do CCR é relativamente nova (ANDRIOLO, 1998), quanto a de instrumentação por fibra ótica é bastante recente (ANSARI, 1997). Assim, sendo, não se teria população em quantidade para ter representatividade estatística, o que deixaria o método sujeito a problemas de validação.

3.1.3 Método do Estudo de Caso

O método do Estudo de caso que, conforme YIN (1994), se refere ao desenvolvimento de detalhado e intensivo conhecimento sobre um único caso ou um pequeno número de casos relatados, é o que mais se aplicaria a pesquisa em questão, pois não requer controle sobre os eventos (ROBSON, 1993).

Pelas razões supracitadas, foi escolhido como método para a pesquisa, o estudo de caso em uma barragem protótipo de CCR, pela aplicação de sensores de fibra ótica pelo método distribuído de medição de temperatura e pelo método espectrométrico de redes de Bragg, comparando seus resultados com a instrumentação convencional por corda vibrante.

3.2 PLANEJAMENTO DO ESTUDO DE CASO

3.2.1 Escolha da Barragem Protótipo

Foi escolhida como protótipo para o estudo de caso a barragem de CCR da

UHE Fundão. A barragem de UHE Fundão localiza-se no Rio Jordão, nas divisas entre as cidades de Cândói-PR e Reserva do Iguaçu-PR. A potência da obra é de 120 MW. A barragem é de CCR, com altura de 45 m e comprimento de 250 m. O volume de CCR aplicado na obra é de 150.000 m³. Na figura 4, é apresentado planta e vista geral da barragem protótipo.

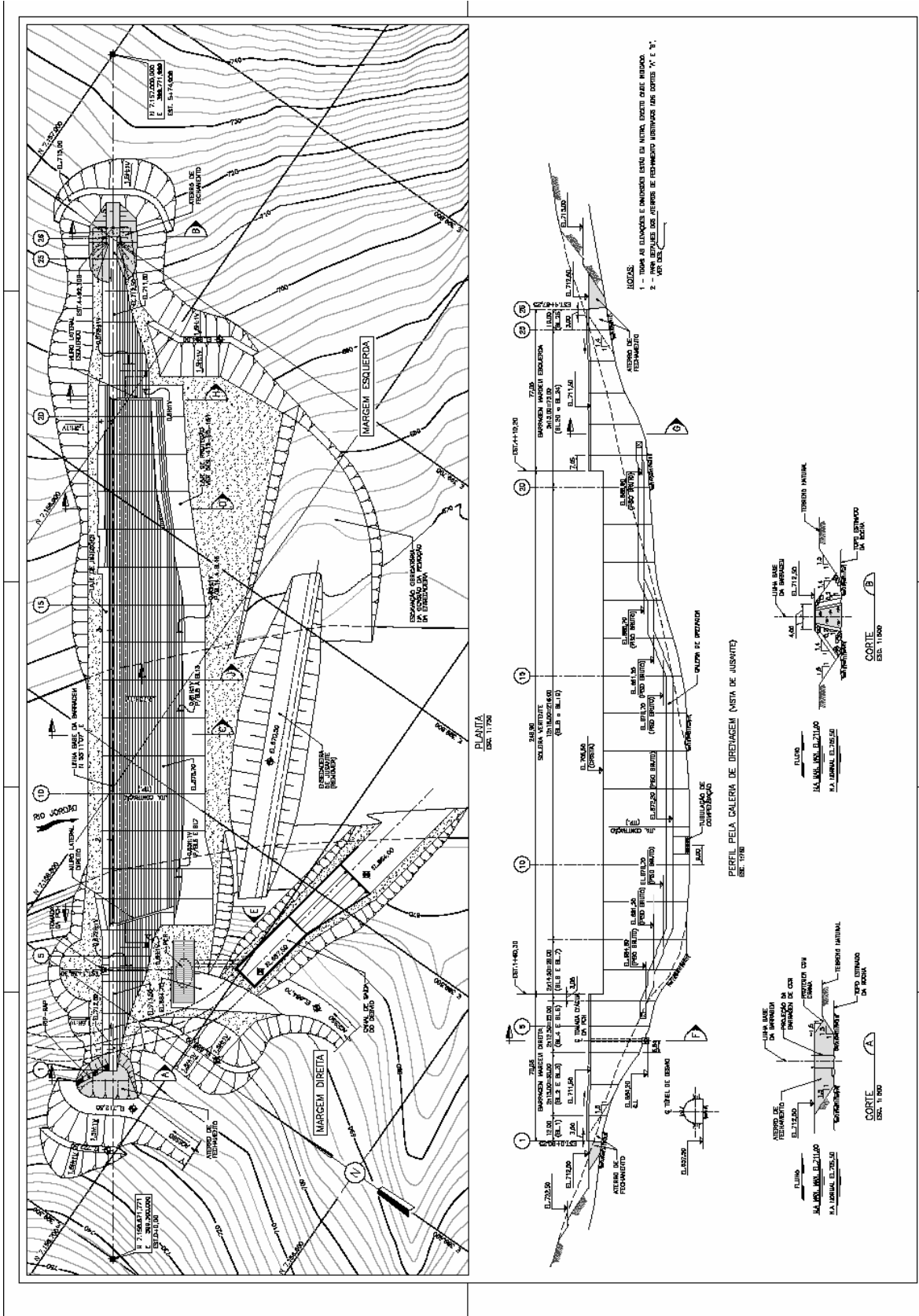


FIGURA 4- PLANTA E VISTA GERAL DA BARRAGEM DE UHE FUNDÃO - (FONTE: CADERNOS DE DESENHOS, PROJETISTA INTERTECHNE)

Na Figura 5, apresenta-se visão do empreendimento durante a construção.



FIGURA 5 - VISTA GERAL DA BARRAGEM DURANTE A CONSTRUÇÃO

A barragem foi escolhida como protótipo pelos patrocinadores COPEL e LACTEC estarem envolvidos com a construção, e pelo fato da COPEL ter participação na ELEJOR, proprietária da obra.

3.2.2 Escolha da Unidade de Análise

A unidade de análise escolhida foi o bloco 11 do protótipo. Neste bloco foram instalados os sensores de fibra ótica distribuído Raman (TFOR), e os sensores de fibra ótica Redes de Bragg (TFOB), assim como a instrumentação convencional de corda vibrante (TCVC), de modo que as comparações puderam ser obtidas integralmente dentro da unidade de análise. Outros blocos foram instrumentados, porém não fazem parte da unidade de análise escolhida para a pesquisa.

Este bloco já havia sido escolhido pelo projetista da obra, para concentrar a maior quantidade de termômetros de corda vibrante. A escolha do projetista baseou-se em ser este bloco o mais alto dentre os blocos da barragem.

3.2.3 Escolha dos Instrumentos e Parceiros

Para buscar responder o problema da pesquisa foram instalados três tipos de instrumentação na barragem protótipo, visando medir a temperatura:

3.2.3.1 Termômetros de corda vibrantes convencionais (TCVC)

Estes sensores já eram previstos no projeto de instrumentação original da obra. Estes instrumentos foram adquiridos pela Construtora Triunfo, construtora da barragem, na quantidade de sete sensores de temperatura, conforme projeto apresentado no item 3.2.5 elaborado pela projetista da obra.

Na Figura 6, apresenta-se detalhe do termômetro convencional de corda vibrante.

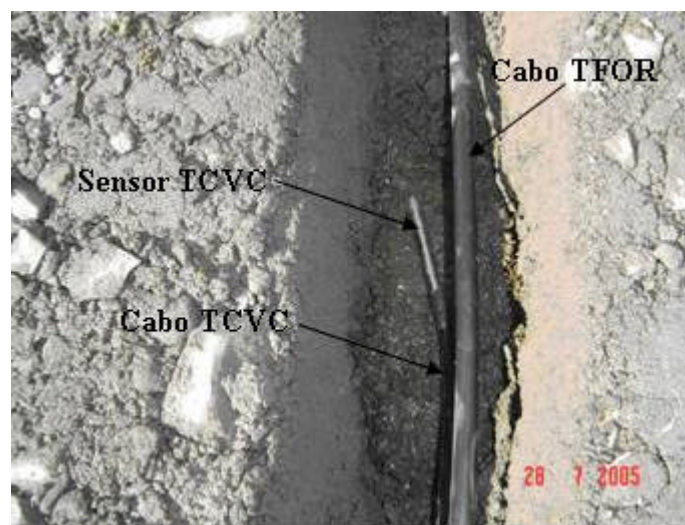


FIGURA 6- TERMÔMETRO CONVENCIONAL DE CORDA VIBRANTE – TCVC, APLICADO AO LADO DO CABO TFOR

Cada sensor com cabos custou em média US\$ 300,00. A instalação destes sensores que seria de responsabilidade da Construtora foi efetuada em parceria com o LACTEC, que possuía equipe de obra já experiente na instrumentação por corda vibrante em obras anteriores, permitindo sincronizar a aplicação destes com os sensores de fibra ótica. A leitura foi efetuada pela Construtora Triunfo utilizando aparelho de leitura adquirido pela mesma, no valor de US\$ 5.000,00.

3.2.3.2 Termômetros de fibra ótica método Redes de Bragg (TFOB)

Estes sensores foram adquiridos pelo LACTEC por interesse da pesquisa. O parceiro escolhido para este tipo de sensor foi a empresa GÁVEA SENSORS, que já tinha experiência na produção em escala artesanal de sensores para instrumentação de estruturas civis. Posteriormente esta empresa fez acordo com a FIBER SENSING, de Portugal, para atuarem juntas no projeto pela experiência desta última em produzir, em escala industrial, sensores para instrumentação de estruturas civis. Na Figura 7 apresenta-se detalhe do termômetro de fibra ótica utilizando redes de Bragg.

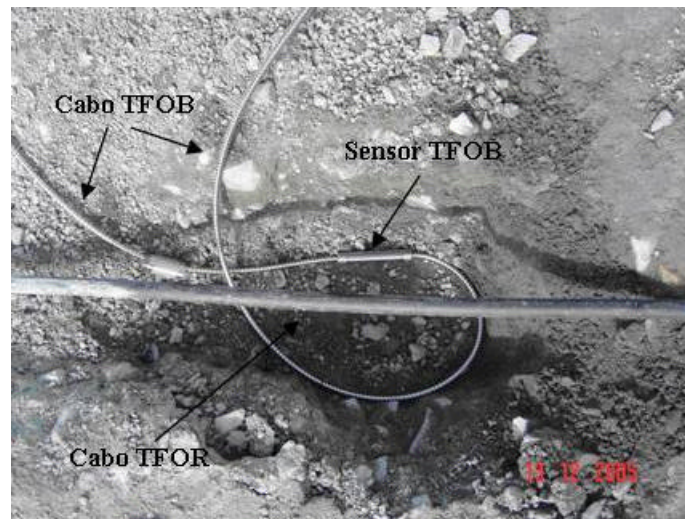


FIGURA 7- TERMÔMETRO DE FIBRA ÓTICA UTILIZANDO REDES DE BRAGG-TFOB, APLICADO AO LADO DO CABO TFOR

Para os testes prévios em laboratório foram adquiridos três Termômetros de fibra ótica redes de Bragg (TFOB) junto à empresa GAVEA SENSORS do Brasil a um custo médio de sensor e cabos de US\$ 200,00 por unidade. Para aplicação no protótipo foram adquiridos quatro termômetros de fibra ótica redes de Bragg (TFOB) junto à empresa FIBER SENSING de Portugal, elaborado de modo compatível com o projeto da instrumentação convencional. O custo médio de sensor e cabos foi de US\$ 300,00 por unidade. Para a instalação deste tipo de sensores, foi efetuada parceria com o LACTEC, sendo que a equipe de obra foi treinada pelo parceiro GAVEA SENSORS, tanto no teste prévio quanto na obra no momento da instalação. A leitura foi feita primeiramente por técnicos da GAVEA SENSORS, em campanhas de leitura em

períodos definidos, e posteriormente pela própria equipe do LACTEC na obra, utilizando aparelho de leitura cedido pela mesma. No primeiro período de leituras, a vinda dos técnicos da GAVEA SENSORS foi patrocinada pelo LACTEC a um custo de cerca de US\$ 400,00 por campanha. Foram efetuadas três campanhas durante este período. Destaca-se que o gasto refere-se apenas as despesas de viagem, pois o parceiro não cobrou o custo horário dos profissionais envolvidos. Ao final da pesquisa, o LACTEC adquiriu aparelho de leitura junto a FIBER SENSING no valor US\$ 12.500,00, devido ao prazo de conclusão não foi possível incluir leituras com este aparelho.

3.2.3.3 Termômetros de fibra ótica método distribuído Raman (TFOR)

O parceiro escolhido para este tipo de sensor foi a Universidade Técnica de Munique (*Technische Universitaet Muenchen*), por ter experiência em aplicação em barragens de CCR no mundo, conforme já citado no Capítulo 2, com referência ao apresentado por AUFLEGER et al. (2003). Os cabos de fibra ótica foram adquiridos pelo LACTEC junto à empresa FURUKAWA, com custo médio de US\$ 3,50/metro. Foram comprados 1.100 metros de fibra, sendo que 900 metros foram aplicados na unidade de análise. Os cabos adquiridos, conforme orientação dos parceiros da TUM, têm uma capa externa em borracha dura, que envolve camada de reforço em aço que por sua vez se dispõe sobre outra camada de borracha dura. Dentro desta casca está inserido duas camadas de um reforço de resistência a tração, preenchidas com um isolante impermeabilizante. No interior deste conjunto protetor, se encontram quatro tubos ocos, um enrijecedor central e dois tubos com duas fibras multimodo. Um tubo só seria suficiente para leitura, porém foram instalados dois por segurança. Os tubos onde se encontravam as fibras são preenchidos com gel. A Figura 8 apresenta detalhe em corte da fibra utilizada.

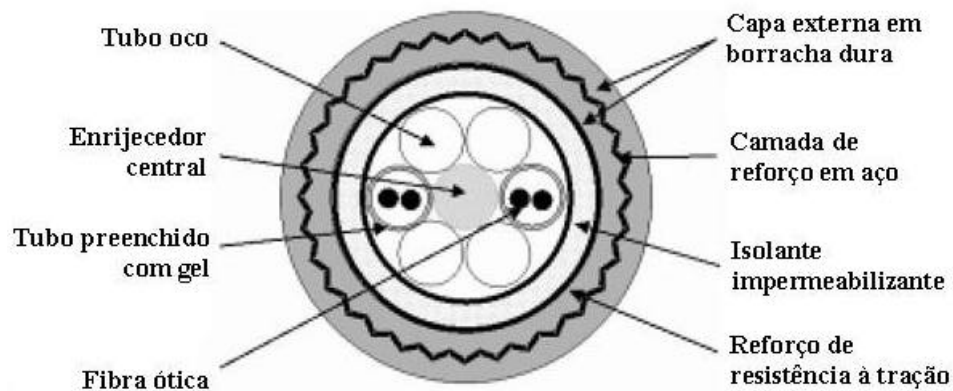


FIGURA 8 - DETALHE EM CORTE DO CABO DE FIBRA ÓTICA TFOR UTILIZADO

Na Figura 9 apresenta-se visão geral do cabo de fibra ótica pelo método distribuído de medição de temperatura Raman, TFOR.



FIGURA 9 - TERMÔMETRO DE FIBRA ÓTICA PELO MÉTODO DISTRIBUÍDO TIPO RAMAN - TFOR, CABO PRETO ADQUIRIDO EM BOBINAS

Para a instalação destes tipos de sensores foi efetuada parceria com o LACTEC, sendo que a equipe de obra foi treinada pelo parceiro TUM, tanto no teste prévio, quanto na obra no momento da instalação. A leitura foi feita primeiramente por técnicos da TUM em campanhas de leitura em períodos definidos. A vinda dos técnicos da Alemanha foi patrocinada pelo LACTEC a um custo médio de US\$ 3.000,00 por visita, sendo cerca de US\$ 1.500,00 gastos com despesas de viagem e US\$ 1.500,00 com os custos horários dos profissionais da TUM envolvidos. Foram efetuadas duas campanhas de leitura no período da dissertação. Ao final da pesquisa, o

LACTEC adquiriu aparelho de leitura junto a empresa SENSORNET, no valor US\$ 56.500,00. Devido ao prazo da dissertação não houve tempo hábil para incluir leituras com este aparelho. O mesmo aconteceu com uma terceira campanha de medição que será feita no enchimento do lago, com uma terceira visita dos alemães.

3.2.4 Estudo Prévio em Laboratório para Treinamento da Equipe e Ajustes

Para diminuir variabilidade aleatória do processo, tanto a validação interna como externa, como para treinar a equipe de instalação e ajustar medidas de projeto e especificação de instalação no protótipo, foi prevista a elaboração prévia de dois testes para a preparação do estudo de caso. Esse procedimento deveu-se à localização física dos especialistas nas duas técnicas de instrumentação de fibra ótica adotadas:

- o primeiro teste da preparação para o estudo de caso procurou verificar o comportamento dos TFOB, e foi levado a cabo, no laboratório do LACTEC em Curitiba envolvendo profissionais da Gávea Sensors;
- o outro, visando verificar o comportamento dos TFOR, ocorreu no laboratório da Universidade Técnica de Munique, TUM, em Obernach na Alemanha.

A análise dos dados da preparação para o estudo de caso foi feita pelo processo de indução analítica conforme proposto por ROBSON (1993), onde foram verificados os resultados a luz das hipóteses assumidas, ou seja, no caso, a hipótese de que a instrumentação por fibra ótica propicia melhor caracterização e conhecimento das características do CCR que os métodos tradicionais. Não houve a necessidade de utilização de programas computacionais específicos para este tipo de análise. O método observacional direto também foi utilizado, visando verificar a necessidade de ajustes no processo de instalação para a aplicação no protótipo.

3.2.4.1 Testes prévios de preparação para a instalação de instrumentação por fibra ótica pelo método redes de Bragg - TFOB

O teste foi feito no prédio do laboratório de Materiais Estruturas – LAME, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, em Curitiba, no estado do Paraná.

O teste previu a execução de um bloco de CCV de 1 x 1 x 1 m. Esta mistura de CCV foi obtida a partir do incremento de água e aditivos em mistura padrão de CCR, até atingir consistência que permitisse adensamento com vibrador de imersão. Neste bloco, foram instalados três termômetros de fibra ótica de redes de Bragg instalados em um mesmo cabo, em série, distantes entre si em um metro, denominados TFOB T1, TFOB T2 e TFOB T3, e um termômetro elétrico convencional, denominado TELC.

Na Tabela 1 é apresentado a mistura utilizada no teste TFOB.

TABELA 1 - MISTURA UTILIZADA NO TESTE TFOB

mistura teste TFOB		
Cimento tipo CPIV*	100	Kg/m ³
água	180	Kg/m ³
areia artificial	1038	Kg/m ³
brita 25mm	615	Kg/m ³
brita 50mm	615	Kg/m ³
plastificante retardador	1,2	Kg/m ³
Consistência slump	40+/-10	mm
% peso seco < 0,075 mm	13,9	%
* nomenclatura NBR marca Votoran		

Foram utilizados agregados da obra de UHE Santa Clara, por possuir mesmo tipo litológico de rocha, basalto, que a barragem protótipo de UHE Fundão. Outra razão da escolha foi que o britador utilizado em UHE Santa Clara seria o mesmo de UHE Fundão. Na ocasião não era possível obter agregados provenientes de rochas das escavações de UHE Fundão, dado que esta ainda não havia iniciado.

Conforme indicado por ANDRIOLO (1998), a mistura foi concebida, adotando-se a curva de Bolomey como indicativa para a curva granulométrica dos agregados na mistura de concreto. Outro fator considerado na mistura resultante,

seguindo indicação do mesmo autor, foi que o teor em peso de material seco, passante na peneira de abertura 0,075 mm, fosse maior que 10 %. O teor de cimento de 100 kg/m³ foi adotado, mesmo sabendo ser maior que o esperado para a barragem protótipo, visando compensar em parte a dissipação térmica do calor gerado no bloco de testes.

A granulometria dos agregados utilizados, assim como a curva granulométrica resultante da mistura são apresentadas no anexo 1.

Os croquis da instalação podem ser vistos na Figura 10, Figura 11 e Figura 12.

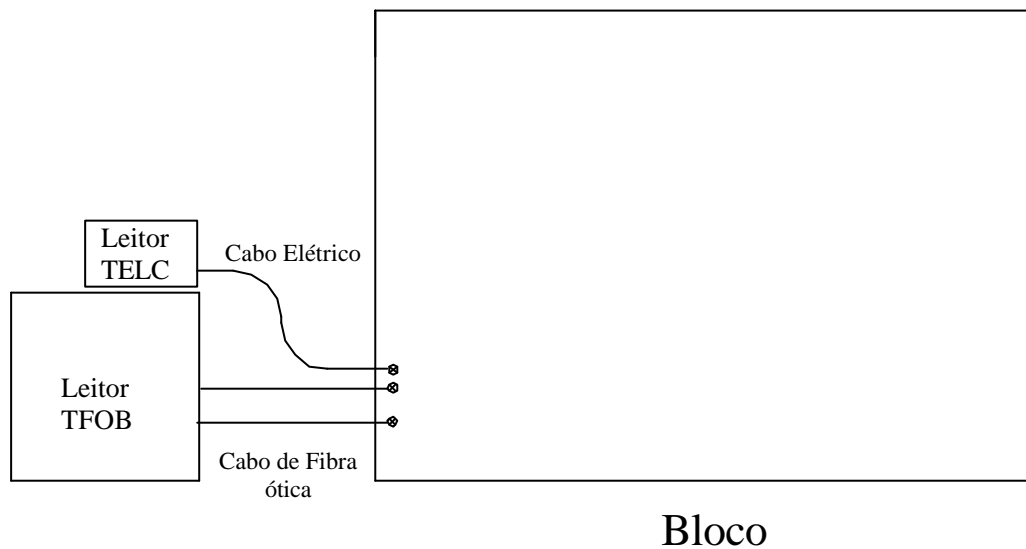


FIGURA 10 – CROQUI EM PLANTA DA ÁREA DE TESTES - TFOB

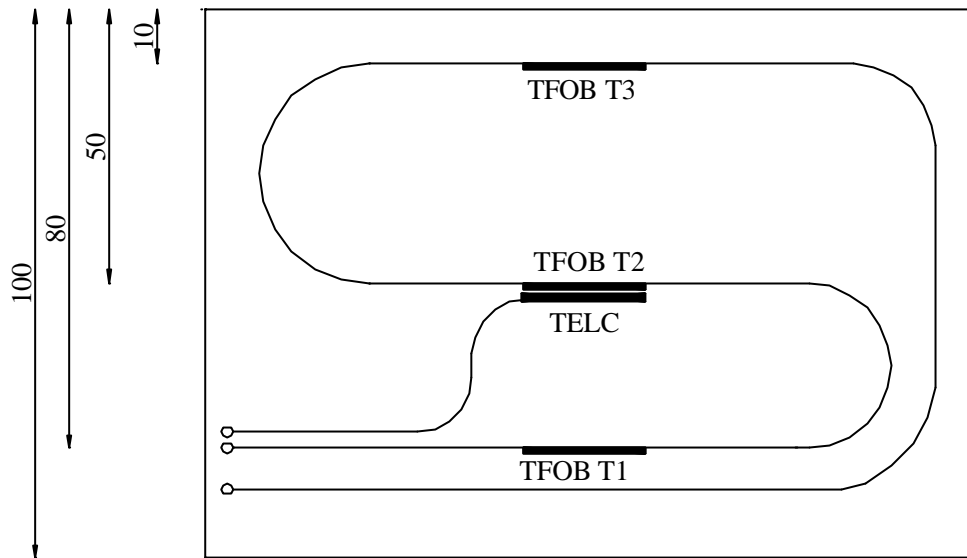


FIGURA 11 - PLANTA DO BLOCO DE TESTES TFOB - SEÇÃO NA METADE DA ALTURA DO BLOCO

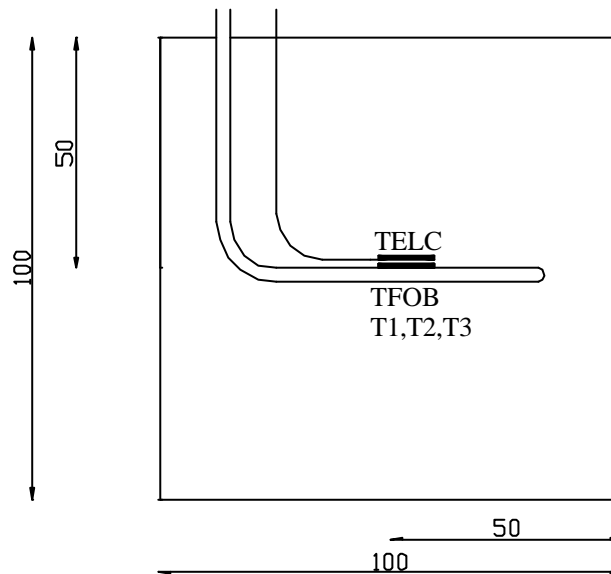


FIGURA 12 - CORTE DO BLOCO DE TESTES TFOB - SEÇÃO NA METADE DA LARGURA DO BLOCO

3.2.4.2 Testes prévios de preparação para instalação de instrumentação por fibra ótica pelo método distribuído Raman

Para a avaliação e treinamento do método, foi realizado teste no laboratório do Instituto Oskar Von Muller da Universidade Técnica de Munique em Obernach na

Alemanha. A opção pela realização do estudo no exterior foi feita pela disponibilidade do equipamento de leitura pelo prazo necessário à pesquisa, assim como por ter sido esta instituição que realizou testes em obras de CCR no passado (AUFLEGER, 2000), tendo, portanto bastante experiência no assunto.

O bloco de teste foi feito com as dimensões 1 x 4 x 0,8 m, e interno a ele foram dispostos cerca de 25 m de cabos de fibra ótica, um ponto de leitura a 25 cm, num total de 100 pontos de leitura, divididos em duas camadas, superior e inferior. Em cada camada, foram dispostas três linhas, uma no centro do bloco e outras duas distantes 10 cm e 20 cm da borda. A distribuição proposta procurou detectar diferenças de comportamento entre os diferentes pontos do bloco e compará-los com o comportamento geral previsto no processo. Foram utilizados mais 33 metros de cabos para operacionalizar a medida da temperatura em tanque com água e possibilitar a permanência do aparelho de leitura em local coberto, perfazendo, portanto, um total de 58 metros de cabos utilizados nos testes. Na Tabela 2 é apresentada a mistura utilizada no teste TFOR.

TABELA 2- MISTURA UTILIZADA NO TESTE TFOR

mistura teste TFOR		
Cimento tipo CEM II/B-S42,4N*	100	Kg/m ³
pó de quartzo	162	Kg/m ³
água	143	Kg/m ³
areia natural fina	417	Kg/m ³
areia natural média	417	Kg/m ³
brita 16mm	324	Kg/m ³
brita 50mm	694	Kg/m ³
brita 63mm	301	Kg/m ³
VeBe	10 a 15	s
% peso seco ?< 0,075 mm	11,4	%
* nomenclatura DIN marca Rohrdorfer		

Como os testes TFOR foram feitos na cidade de Obernach na Alemanha, foi utilizado o agregado disponível na região. Este agregado era extraído do Rio Isar na cidade de Wallgau e processada em britador no próprio local da extração.

Da mesma forma que para os testes TFOB, para a mistura utilizada nos testes TFOR foi concebida conforme indicado por ANDRIOLO (1998), ou seja, adotando-se

a curva de Bolomey como indicativa para a curva granulométrica dos agregados na mistura de concreto. Outro fator considerado na mistura resultante, indicado pelo mesmo autor, foi que o teor em peso de material seco, passante na peneira de abertura 0,075mm, fosse maior que 10%. Para atender a este limite mínimo foi adicionado pó de quartzo na mistura de agregados. O teor de cimento de 100 kg/m^3 foi adotado, mesmo sabendo ser maior que o esperado para a barragem protótipo, visando compensar em parte a dissipação térmica do calor gerado no bloco de testes.

A granulometria dos agregados utilizados, assim como a curva granulométrica resultante da mistura são apresentadas no anexo 1.

Da Figura 13 à Figura 16, são apresentados croquis dos testes.

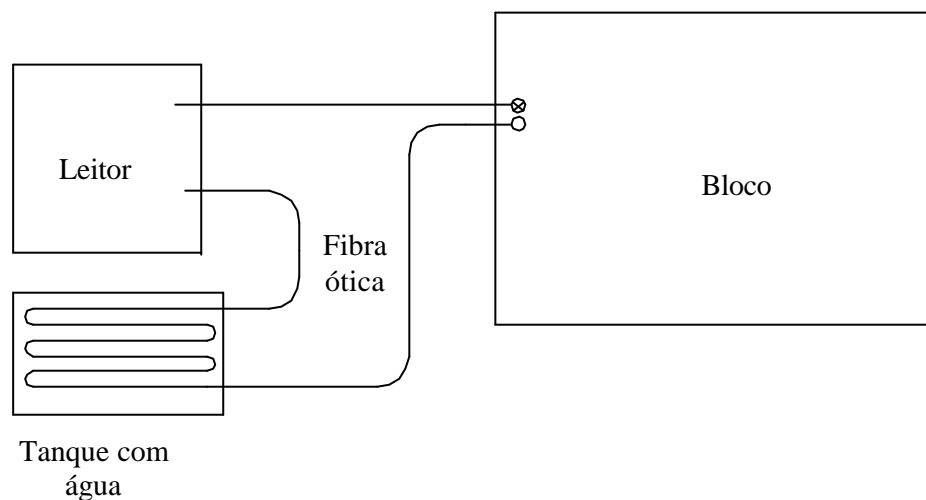


FIGURA 13 - CROQUI EM PLANTA DA ÁREA DE TESTES - TFOR

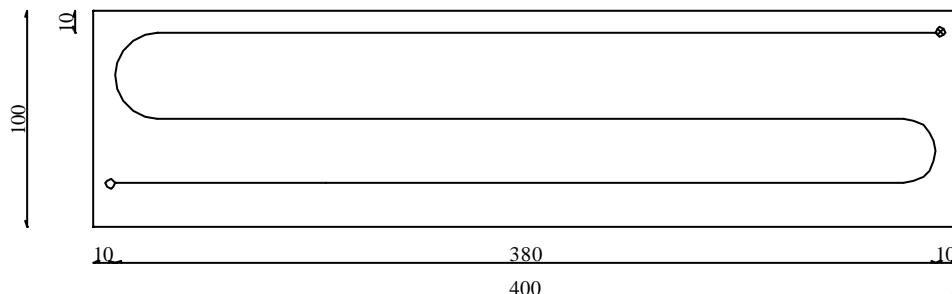


FIGURA 14 - PLANTA DO BLOCO DE TESTES – TFOR, CAMADA INFERIOR

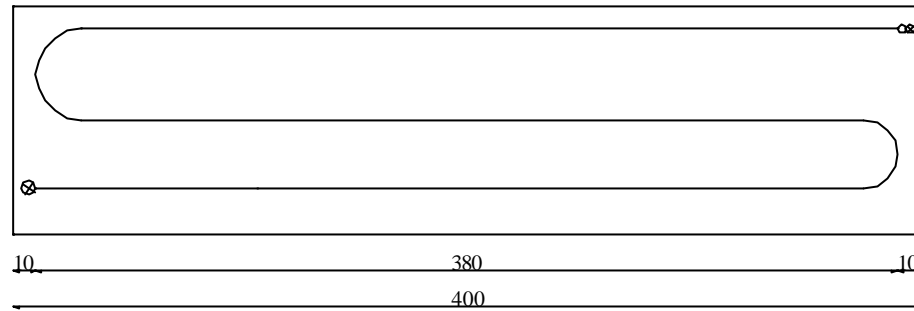


FIGURA 15 - PLANTA DO BLOCO DE TESTES – TFOR, CAMADA SUPERIOR

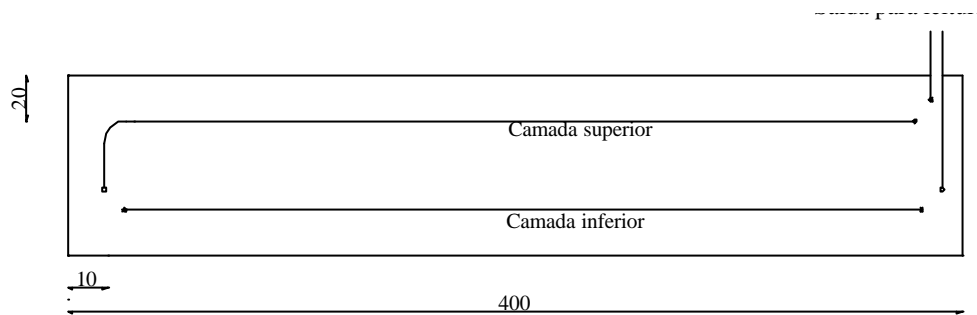


FIGURA 16 - CORTE DO BLOCO DE TESTES – TFOR, SEÇÃO NA METADE DA LARGURA

3.2.5 Projeto da Aplicação da Instrumentação no Protótipo

O objetivo do projeto foi aplicar os diferentes tipos de sensores ocupando o máximo de sua capacidade. No caso do método distribuído, optou-se por instrumentar toda a seção com uma rede de cabos. Os sensores de fibra ótica utilizando redes de Bragg foram instalados em série utilizando mesma fibra. Para estes, visando comprovar a possibilidade de leitura de diversos tipos de instrumentos em série no mesmo cabo, foi colocado na série de termômetros, também extensômetros. Para comparação de resultados, os três tipos foram projetados de modo que pudesse haver locais que fossem medidos ao mesmo tempo pelos três tipos de sensores. A Figura 17 mostra um destes locais.

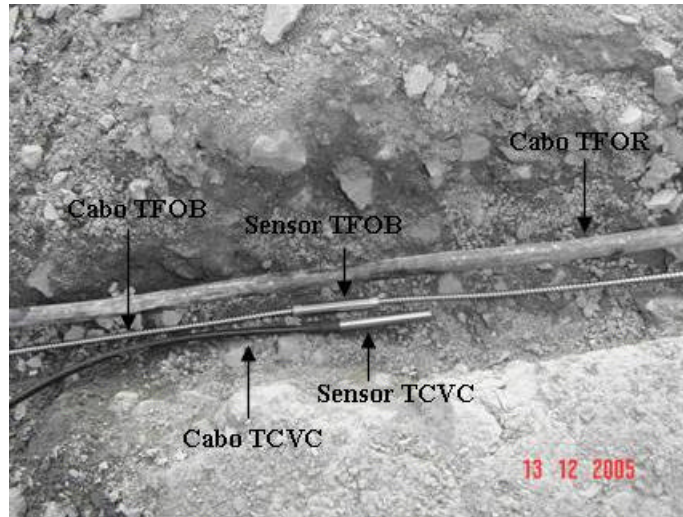


FIGURA 17 - DETALHE TÍPICO DOS LOCAIS EM QUE A TEMPERATURA FOI MEDIDA SIMULTANEAMENTE PELOS TRÊS TIPOS DE SENSORES ESTUDADOS :TCVC, TFOB E TFOR

Na Tabela 3 e Tabela 4 são apresentadas as misturas utilizadas na barragem de UHE Fundão.

TABELA 3 - MISTURA UTILIZADA NA BARRAGEM DE UHE FUNDÃO ABAIXO DA COTA 670,00M

mistura CCR 125 barragem UHE FUNDÃO		
Cimento tipo CPII-F*	55	Kg/m3
cinza volante Candiota	25	Kg/m3
água	132	Kg/m3
areia artificial	1161	Kg/m3
brita 25mm	628	Kg/m3
brita 50mm	628	Kg/m3
plastificante retardador	1,39	Kg/m3
VeBe	15 a 20	s
% peso seco ? < 0,075 mm	11,7	%
* nomenclatura NBR marca Votoran		

TABELA 4 - MISTURA UTILIZADA NA BARRAGEM DE UHE FUNDÃO ACIMA DA COTA 670,00M

mistura CCR 126 barragem UHE FUNDÃO		
Cimento tipo CPII-F*	50	Kg/m3
cinza volante Candiota	20	Kg/m3
água	130	Kg/m3
areia artificial	1191	Kg/m3
brita 25mm	631	Kg/m3
brita 50mm	631	Kg/m3
plastificante retardador	1,3	Kg/m3
VeBe	15 a 20	s
% peso seco ? < 0,075 mm	11,3	%
* nomenclatura NBR marca Votoran		

No anexo 1 são apresentadas mais informações sobre os agregados utilizados nas misturas.

Nos itens seguintes serão descritos mais detalhes dos projetos de instalação de cada tipo de sensor estudado.

3.2.5.1 Projeto de instalação dos sensores TCVC

O projeto de instalação dos termômetros convencionais de corda vibrante, TCVC, seguiu o projeto original da instrumentação da barragem feito pelo projetista da obra. Apresenta-se na Figura 18, alocação dos sensores no bloco 11 da barragem.

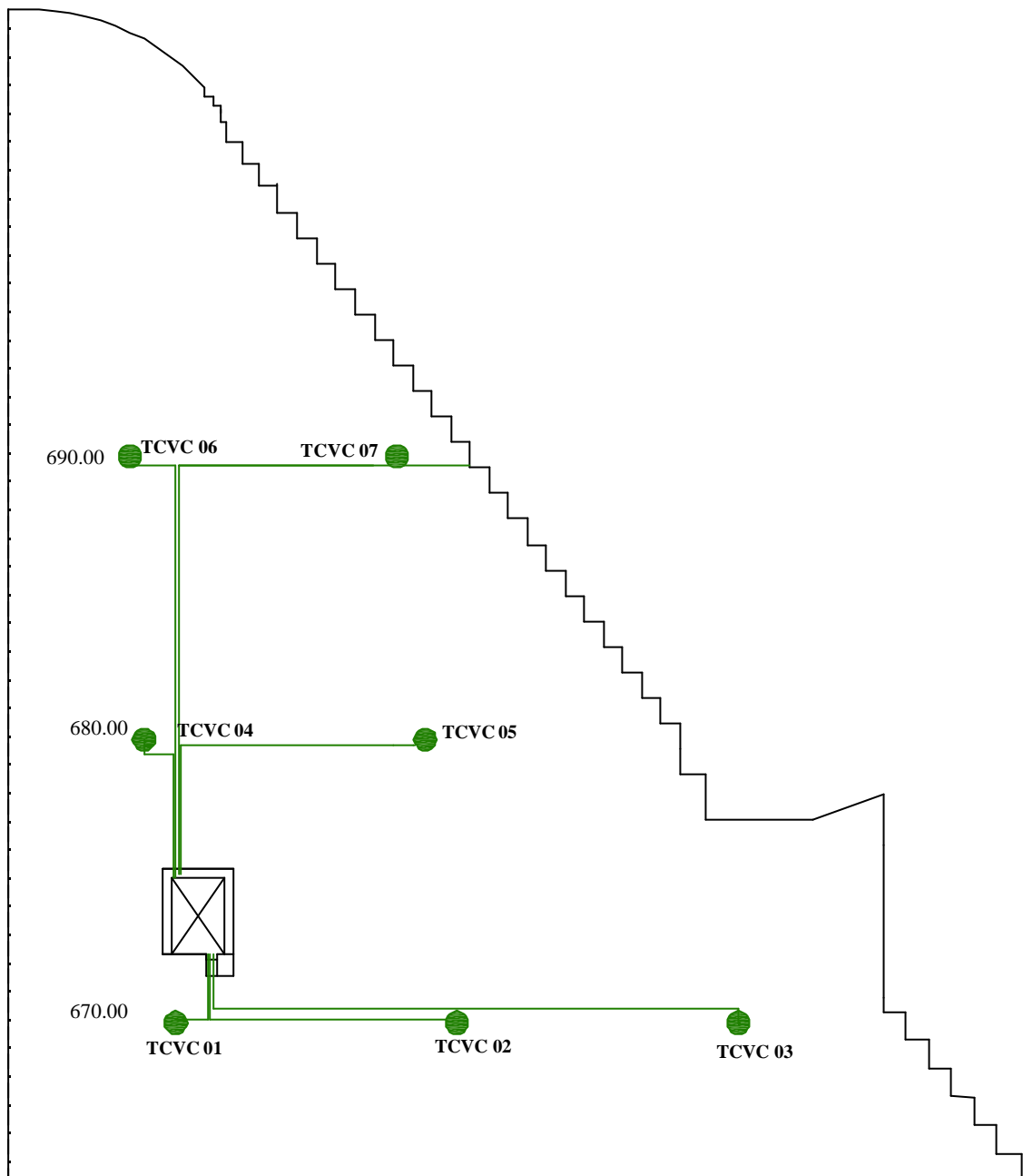


FIGURA 18 - SEÇÃO INSTRUMENTADA DO BLOCO B11 UHE FUNDÃO - ALOCAÇÃO DOS SENSORES TCVC

3.2.5.2 Projeto de instalação dos sensores TFOB e EFOB

Para o projeto de instalação dos termômetros de fibra ótica utilizando redes de Bragg, TFOB, a intenção era seguir a mesma locação dos termômetros TCVC, porém em vista de atraso na entrega dos referidos sensores, não foi possível aplicar

sensores TFOB na elevação 670,00. Para as elevações 680,00 e 690,00, todavia, os sensores foram aplicados no mesmo local dos sensores convencionais. Para alocação dos extensômetros EFOB foram testados três posições relativas ao TFOB, um a montante e um a jusante na elevação 680,00 e outro mais distante, na montante do bloco próximo a junta. Na Figura 19, apresenta-se alocação dos termômetros TFOB e extensômetros EFOB no bloco 11 de UHE Fundão.

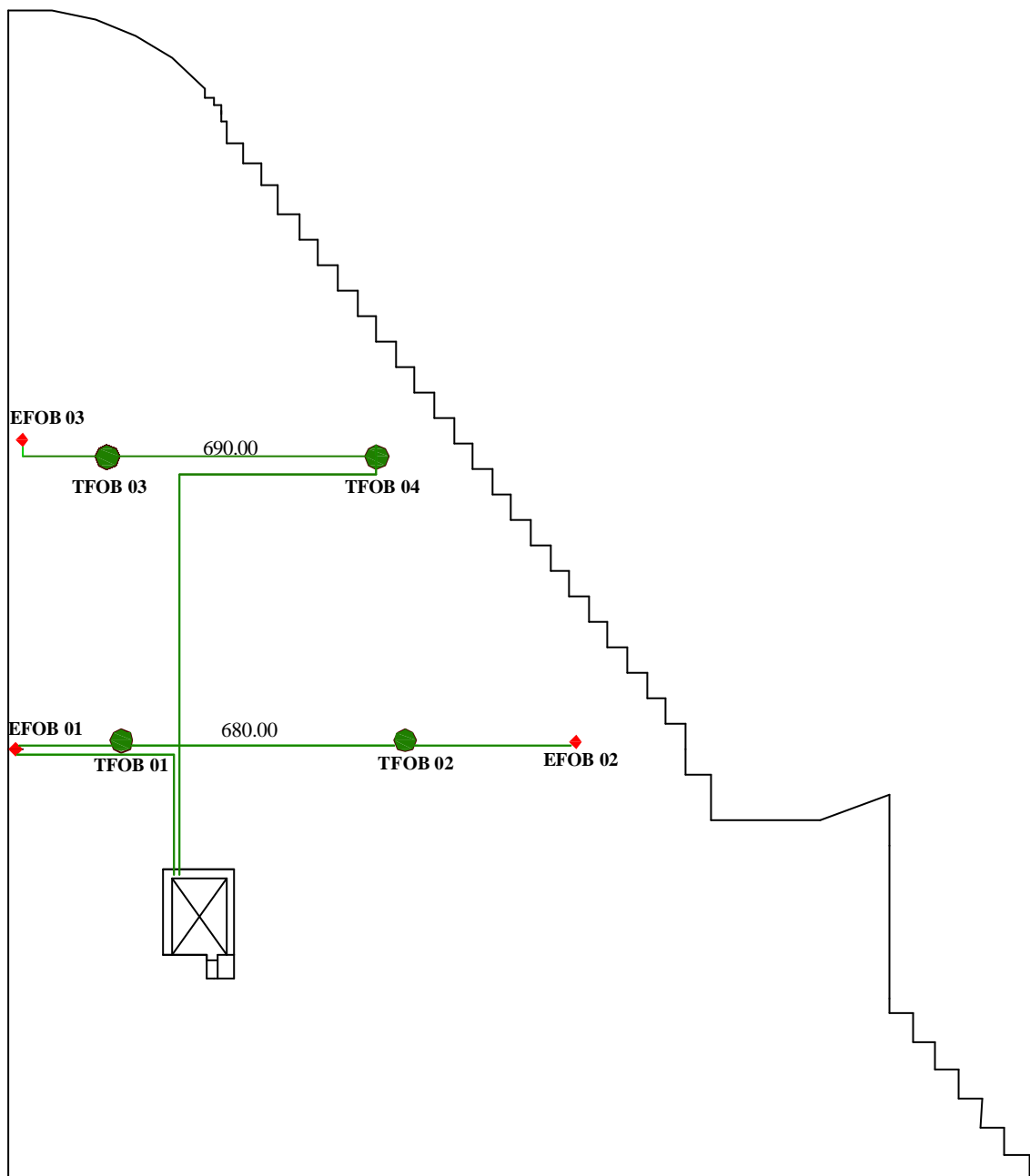


FIGURA 19 - SEÇÃO INSTRUMENTADA DO BLOCO B11, UHE FUNDÃO – ALOCAÇÃO DOS SENSORES TFOB E EFOB

Na Figura 20, é apresentada alocação em planta do grupo de instrumentos TFOB e EFOB da elevação 690,00. Como já destacado acima, para a elevação 680,00, os sensores EFOB foram instalados no mesmo alinhamento dos TFOB.

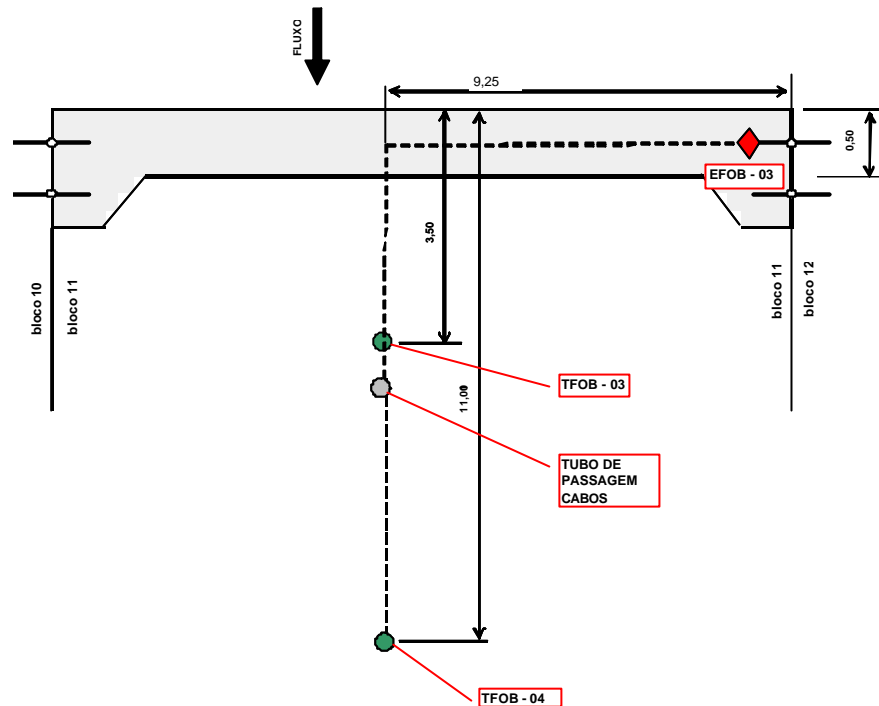


FIGURA 20 - CROQUI EM PLANTA DA INSTALAÇÃO DO TFOB E EFOB EL 690,00

Destaca-se que os termômetros TFOB foram instalados na mesma fibra que extensômetros EFOB, visando verificar se a leitura da temperatura seria afetada ou não pela ligação em série. Por não ser objeto da presente pesquisa, os resultados e análise dos extensômetros EFOB não será incluída nesta dissertação, restringindo os estudos à análise da evolução da temperatura do concreto. A utilização de mesmo cabo para outro tipo de aparelho em série pode ser uma vantagem competitiva, já que ao se utilizar TFOB, pode-se prever a utilização do mesmo cabo dos termômetros para a instalação de outros aparelhos da mesma tecnologia.

3.2.5.3 Projeto de instalação dos sensores TFOR

O projeto de alocação dos sensores TFOR foi sugerido pelos parceiros alemães da TUM, e buscou aplicar 800 metros de fibras óticas, dividido em dois

trechos de 400m, de modo a cobrir toda a seção instrumentada. A divisão em dois trechos baseia-se na idéia de que, ocorrendo qualquer dano aos cabos em um trecho, permaneceria o outro inalterado, permitindo ainda conclusões para a pesquisa. A Figura 21 apresenta a seção tipo para os cabos do método distribuído Raman.

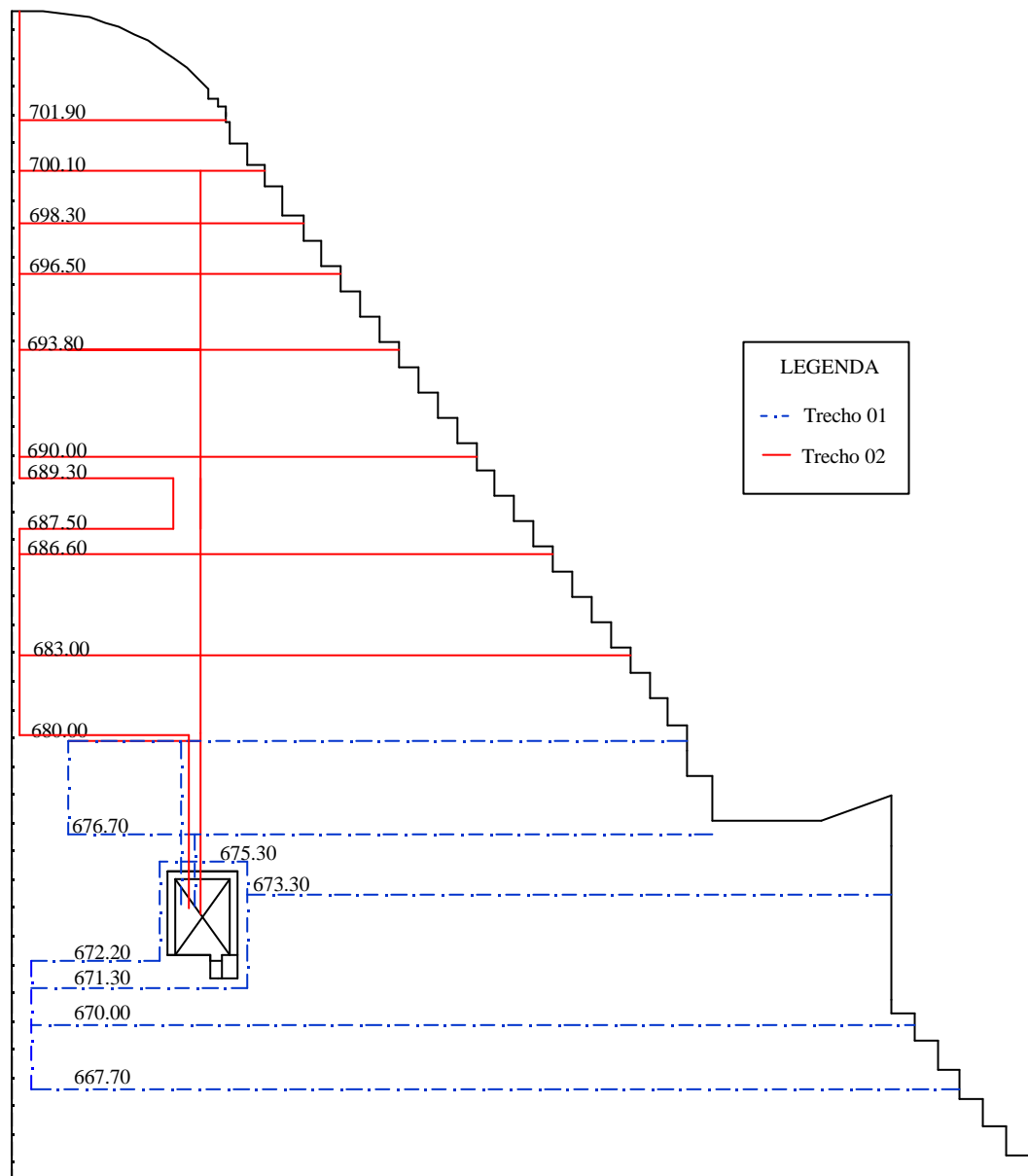


FIGURA 21 - SEÇÃO INSTRUMENTADA DO BLOCO B11, UHE FUNDÃO, ALOCAÇÃO DOS SENSORES TFOR

Em cada elevação é aplicada uma laçada de cabos, *loop*, buscando efetuar leitura redundante para aumento de sua precisão. Na figura 22 é apresentado este detalhe típico para todas as elevações.

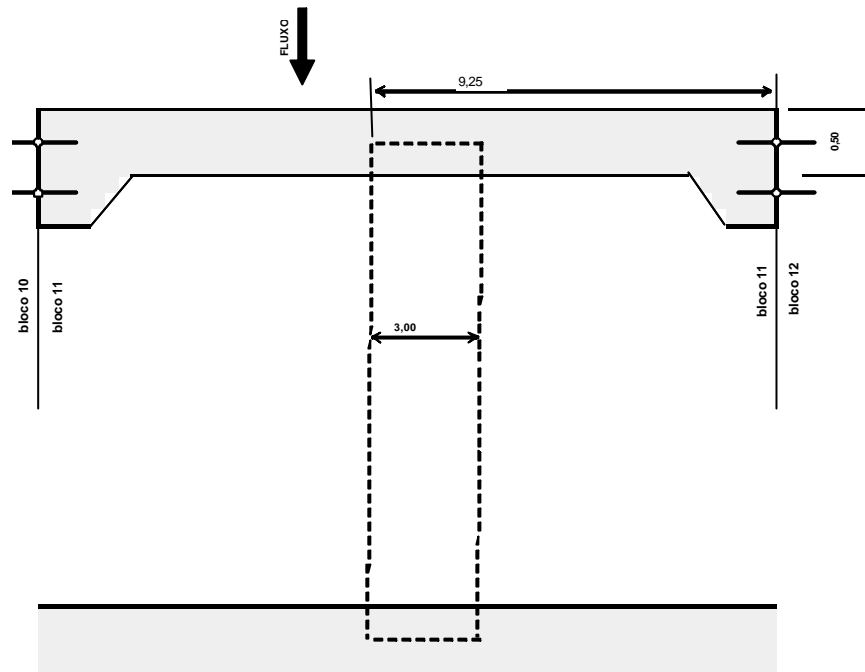


FIGURA 22 - CROQUI EM PLANTA DA SEÇÃO TIPO DE INSTALAÇÃO DO TFOR

Para cada elevação, foram aplicados os cabos de modo a cobrir toda a extensão montante/jusante da barragem. No projeto não foi optado por espaçar os cabos mais que os 4 m, já que, conforme AUFLEGER et al. (2003), a temperatura não difere significativamente no bloco no sentido longitudinal da barragem. Na aplicação real no protótipo, o projeto teve que ser revisado, pois teria interferência com o projeto de furação de drenos de maciço pondo em risco a integridade dos cabos. Foi adotado o espaçamento de 3,0 m.

3.3 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS

Para a coleta dos dados para o estudo de caso utilizou-se o método observacional direto conforme proposto por ROBSON (1993). Foram lidos os resultados dos sensores instalados na unidade de análise. Foram observados e registrados: os projetos de instalação, os recursos necessários, os custos, os modos de

operação e iteração com o meio, para cada uma das tecnologias aplicadas. Foi planejado obter o maior número de leituras possível no período de construção, para posterior comparação e análise. A quantidade de leituras dos sensores de fibra ótica teve limitações pela disponibilidade de instrumentos de leitura e custos de técnicos. A quantidade de leitura dos sensores de corda vibrante seguiu a especificação feita pelo projetista da obra.

3.4 ESCOLHA DO MÉTODO DE ANÁLISE

A análise dos dados para a preparação e para o estudo de caso foi feita pelo processo de indução analítica conforme proposto ROBSON (1993), onde foram verificados os resultados a luz das hipóteses assumidas, ou seja, no caso a hipótese de que a instrumentação por fibra ótica propicia melhor caracterização e conhecimento das características do CCR que os métodos tradicionais. O método observacional direto, citado pelo mesmo autor, também foi utilizado, sendo que na preparação adicionalmente foi usado para verificar se havia necessidade de ajuste para aplicação no protótipo.

Não houve a necessidade de utilização de programas computacionais específicos para este tipo de análise.

3.5 ESCOLHA DO MÉTODO DE VALIDAÇÃO

A validação interna escolhida para os testes prévios de preparação da aplicação no protótipo, foi feita comparando-se os resultados das leituras dos instrumentos de fibra ótica com conceitos e coerência teórica, tais como distância da superfície, posição em relação ao maior volume de concreto e checando as explanações conflitantes (MILES e HUBERMANN, 1987). Para o estudo de caso efetuado com a aplicação em protótipo foi utilizada a técnica da triangulação de dados entre os resultados das leituras de cada tipo de instrumento de fibra ótica: TFOB,

TFOR, com instrumentação convencional de corda vibrante, TCVC. O mesmo foi feito comparando-se os resultados da análise observacional das características de instalação e interação com o processo construtivo. Foi utilizada também a análise de séries temporais (YIN, 2001) para verificar o desempenho no tempo da leitura de cada tipo de aparelho.

Em virtude de que o comportamento térmico de cada barragem é diferente, a validação externa foi feita pela própria comparação com instrumentação convencional de corda vibrante, previamente escolhida por ter sido já usada na instrumentação de outras barragens de CCR (MUSSI et al., 1999). A escolha de parceiros com experiência comprovada na aplicação em outras obras (AUFLEGER et al., 2003) também foi utilizado como fator de validação externa.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 PREPARAÇÃO PARA O ESTUDO DE CASO

4.1.1 Preparação para a Instalação de Instrumentação por Fibra Ótica pelo Método de Redes de Bragg

Nas Figura 23 e Figura 24 são apresentados as algumas fotos ilustrativos do teste realizado.

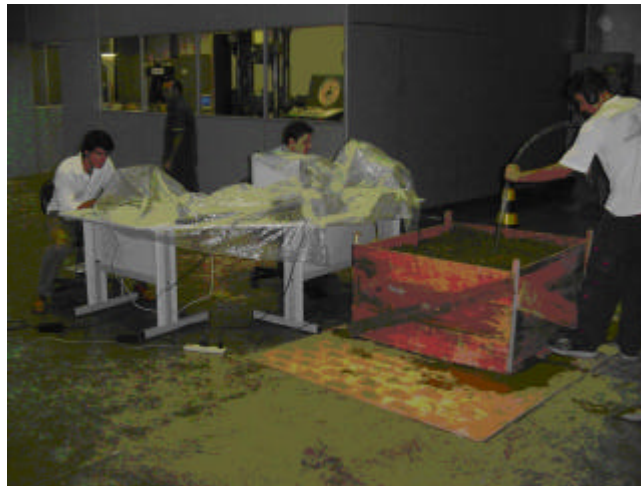


FIGURA 23 - VISÃO GERAL DA ÁREA DE TESTES - TFOB



FIGURA 24 - DETALHE DA COBERTURA DOS INSTRUMENTOS INSTALADOS – TESTE TFOB

Na Figura 25, são apresentados os resultados das leituras do sensor TFOB T2 aplicado na mesma posição no bloco em que foi aplicado o sensor elétrico convencional (TELC). Em análise desta figura, pode se notar que o sensor TFOB T2 indicou leitura coerente com o sensor convencional TELC, o que permite concluir que houve coerência entre a leitura de ambos.

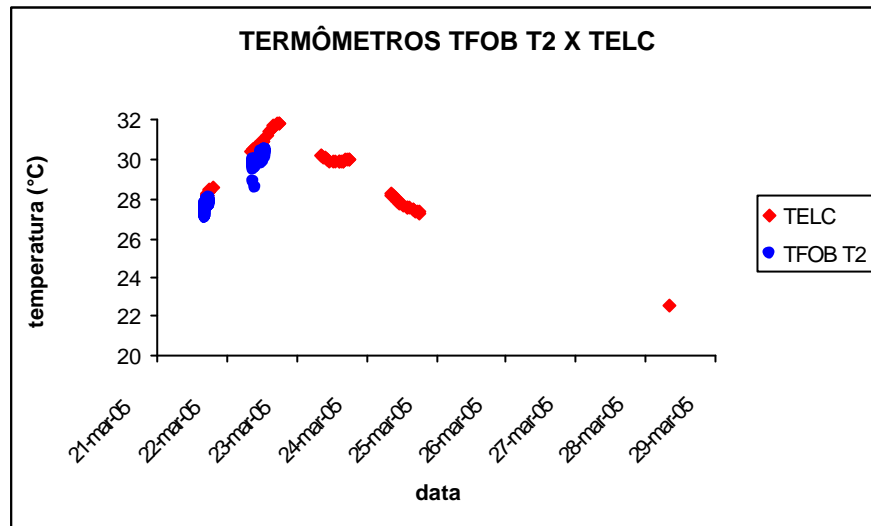


FIGURA 25 - RESULTADOS DE LEITURA DOS SENSORES TFOB T2 E TELC

Na Figura 26, é apresentada a comparação entre as leituras dos sensores TFOB T1, T2 e T3 aplicados em diferentes pontos do bloco. Ainda pela Figura 26 pode se concluir que os TFOB T1, T2 e T3 indicaram entre si, leituras coerentes com a posição dos mesmos no bloco, ou seja, o sensor TFOB T2 instalado no meio do bloco resultou evolução de temperatura, nas primeiras 24 horas, maior que o TFOB T3 instalado 20 cm da forma e ambos maiores que o TFOB T1 instalado mais próximo a borda do bloco, a 10 cm da forma.

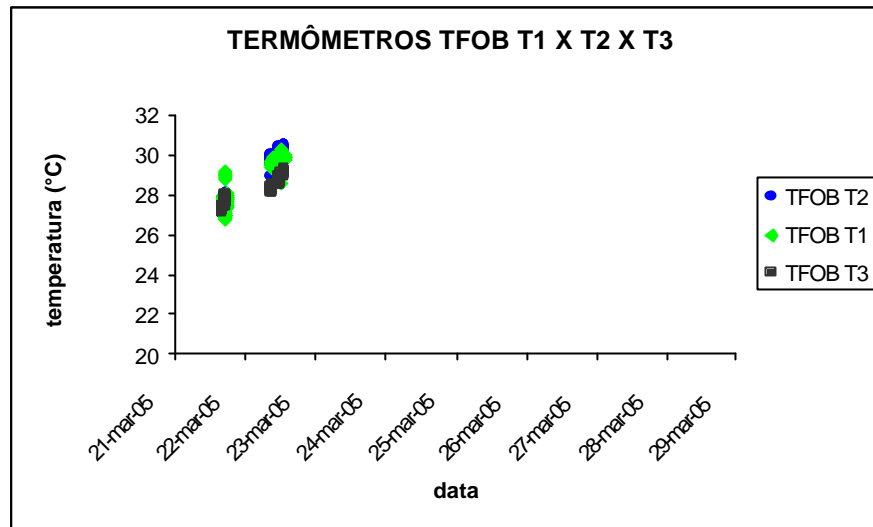


FIGURA 26 - COMPARAÇÃO TFOB T1, TFOB T2 E TFOB T3

Da análise observacional direta pode se destacar que alguns ajustes seriam necessários antes da aplicação no protótipo UHE Fundão e sobre os quais foram tomadas medidas corretivas para o protótipo:

- o cabo de fibra ótica de transmissão assim o sensor propriamente dito, trecho marcado com redes de Bragg, necessitariam ser mais bem protegidos dos choques mecânicos típicos de processos de lançamento de CCR. Como o referido teste foi efetuado aumentando a consistência de uma mistura padrão de CCR com adição de água e aditivos até tornar possível o adensamento com vibrador convencional, os mesmos serão mais sujeitos a dano com a compactação por rolos vibradores no protótipo. A medida tomada foi proteger os cabos com revestimento metálico;
- o programa de leitura deveria ser ajustado, aumentando o intervalo entre as leituras, que no caso era de 5 s, o que na obra geraria um número excessivo de dados, em período que o concreto não tem variação significativa. Decidiu-se que seriam feitas medições a cada 30 minutos.

4.1.2 Preparação para Instalação de Instrumentação por Fibra Ótica pelo Método Distribuído Raman

Da Figura 27 à Figura 31 são apresentados algumas fotos dos testes realizados.



FIGURA 27 - VISÃO GERAL DA ÁREA DE TESTES - TFOR



FIGURA 28 - DETALHE DA COLOCAÇÃO DOS CABOS NA CAMADA INFERIOR, BLOCO DE TESTES TFOR



FIGURA 29 - DETALHE DA COLOCAÇÃO DOS CABOS NA CAMADA SUPERIOR, BLOCO DE TESTES TFOR



FIGURA 30 - DETALHE DO MÉTODO DE COMPACTAÇÃO DO CCR, BLOCO DE TESTES TFOR



FIGURA 31 - VISÃO GERAL DO BLOCO DE TESTES TFOR DEPOIS DE CONCLUÍDO

Na Figura 32, são apresentados os resultados obtidos dos testes.

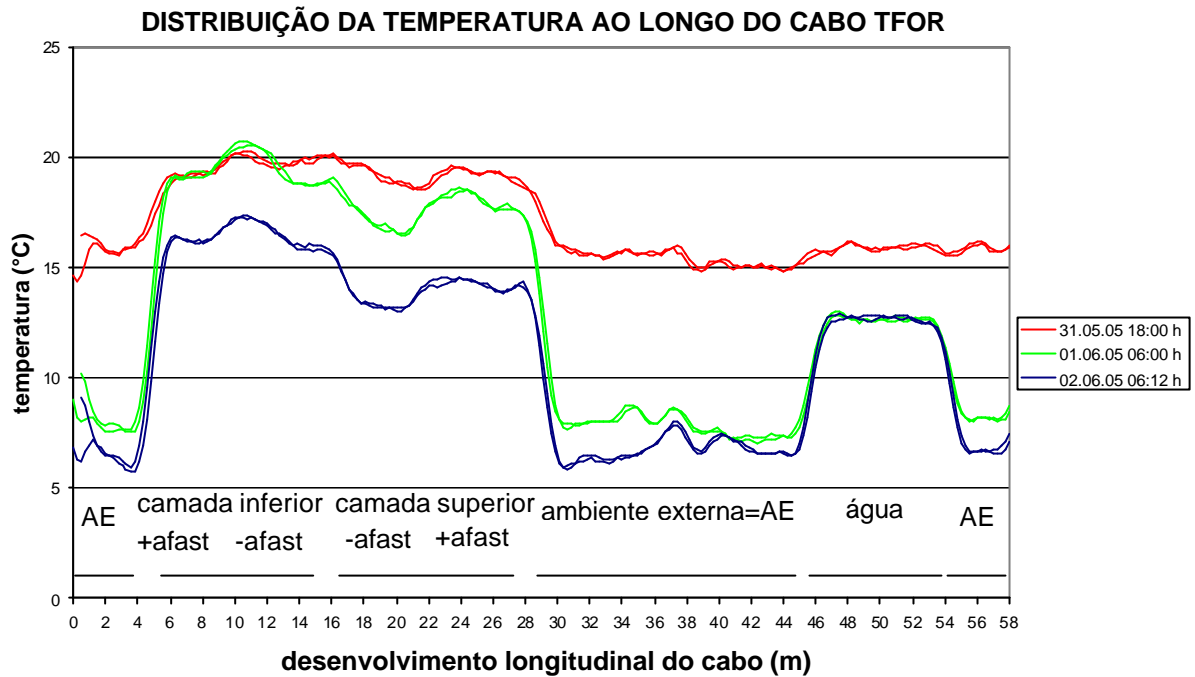


FIGURA 32 - RESULTADOS OBTIDOS BLOCO DE TESTES TFOR

Observando a Figura 32, pode se concluir que os resultados obtidos indicaram coerência entre as leituras nas diversas regiões do bloco, como pode se concluir abaixo:

- a diminuição de temperatura no cabo menos afastado da face foi maior que do mais afastado;
- a temperatura no centro do bloco foi maior que nas bordas;
- a diminuição de temperatura na camada superior foi maior que na camada inferior;
- a variação da temperatura ambiente foi maior que a variação da temperatura na água.

Apesar da impossibilidade de comparação com sensores que utilizam tecnologia diversa da proposta e que tenham resultados comparados, verifica-se a coerência e consistência apresentadas durante as medidas do teste.

Da observação da instalação não foram detectados necessidade de ajustes

significativos para aplicação no estudo de caso. Destaca-se, entretanto, ter sido de grande valia os testes para treinamento, dado que não se havia ainda instalado este tipo de aparelho no Brasil.

4.2 ESTUDO DE CASO

4.2.1 Resultados de Medição da Temperatura Ambiente

Na Figura 33, apresenta-se as medições de temperatura ambiente realizadas no canteiro de obras da UHE Fundão.

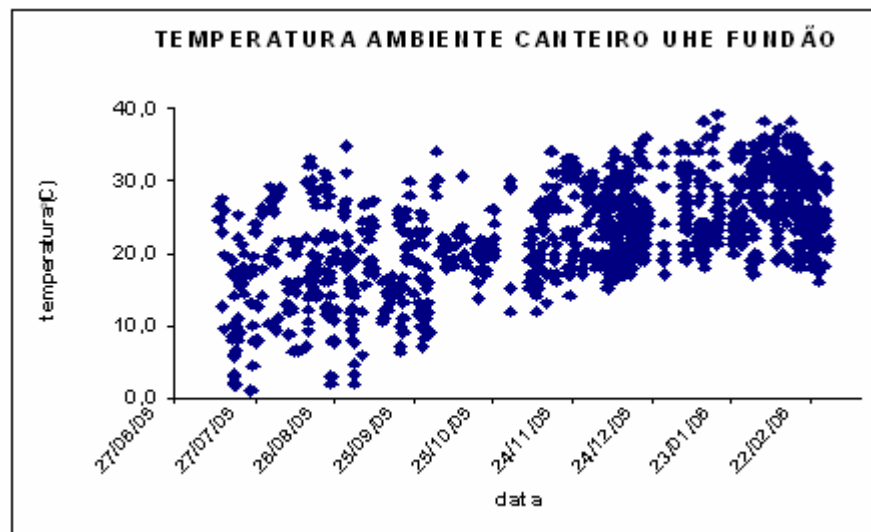


FIGURA 33 - TEMPERATURA AMBIENTE – CANTEIRO DE OBRAS UHE FUNDÃO

Destaca-se que as leituras da temperatura ambiente foram medidas na área externa coberta do laboratório de concreto da obra.

4.2.2 Resultados Obtidos das Leituras dos Instrumentos

4.2.2.1 Termômetros TCVC

Na seqüência da Figura 34 à Figura 42, apresenta-se o procedimento de instalação dos sensores convencionais de corda vibrante, TCVC.



FIGURA 34 - COLOCAÇÃO DE FORMA DE BLOCKOUT ANTERIORMENTE À PASSAGEM DO ROLO - TCVC



FIGURA 35 - COMPACTAÇÃO DA REGIÃO A SER INSTRUMENTADA - TCVC



FIGURA 36 - RETIRADA DE FORMA DE BLOCKOUT APÓS A PASSAGEM DO ROLO - TCVC



FIGURA 37 - ACABAMENTOS NOS LOCAIS ONDE SERÃO COLOCADOS OS SENSORES TCVC



FIGURA 38 - COLOCAÇÃO DE SENSORES E CABOS TCVC: DESTACA-SE QUE NA MESMA CANALETA INSTALOU-SE TFOR E TFOB PARA COMPARAÇÃO



FIGURA 39 - COBERTURA DOS APARELHOS COM CONCRETO CONVENCIONAL FLUIDO



FIGURA 40 - PROTEÇÃO COM CONCRETO CONVENCIONAL DA REGIÃO INSTRUMENTADA - TCVC



FIGURA 41 - LANÇAMENTO DE CCR SOBRE A REGIÃO INSTRUMENTADA - TCVC



FIGURA 42 - COMPACTAÇÃO CUIDADOSA COM COMPACTADOR MANUAL SOBRE A REGIÃO INSTRUMENTADA TCVC: DESTACA-SE QUE O ROLO COMPACTA A REGIÃO ADJACENTE

Da Figura 43 à Figura 45, são apresentadas as leituras dos termômetros TCVC, cujas alocações estão descritas na Figura 18.

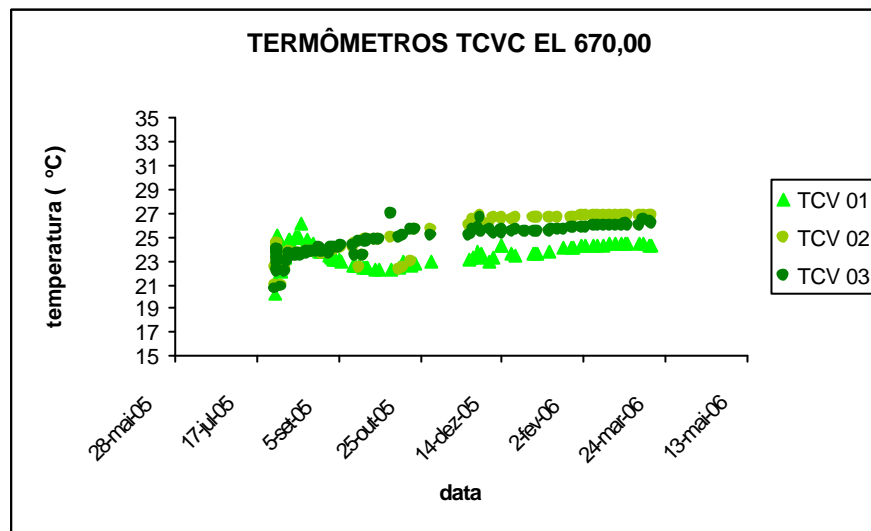


FIGURA 43 - RESULTADOS DE LEITURAS DE TERMÔMETROS TCVC INSTALADOS NA EL. 670,00

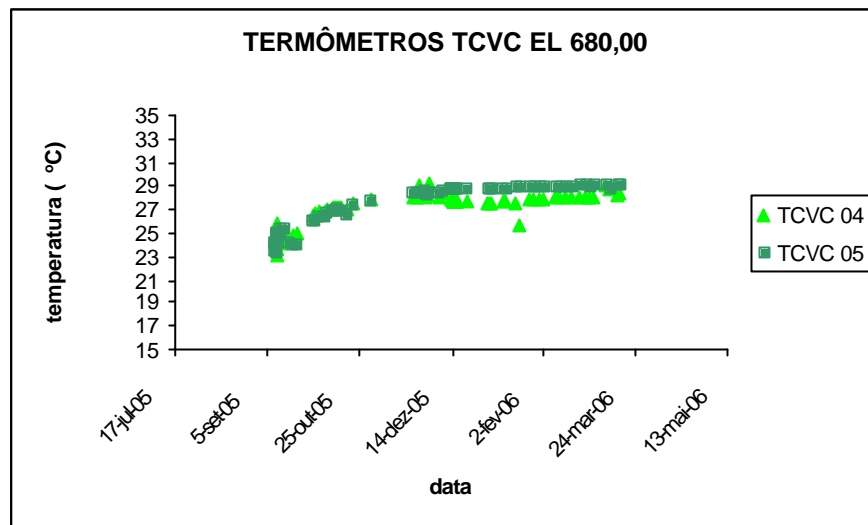


FIGURA 44 - RESULTADOS DE LEITURAS DE TERMÔMETROS TCVC INSTALADOS NA EL. 680,00

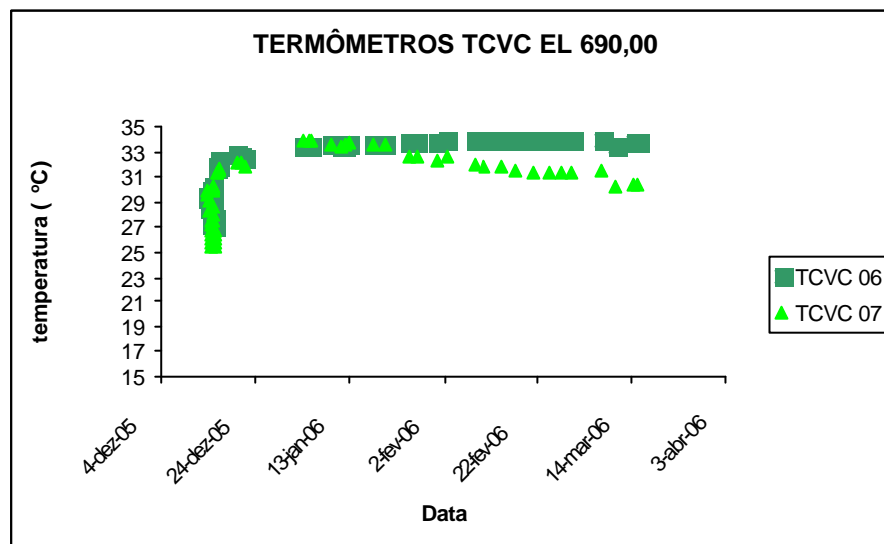


FIGURA 45 - RESULTADOS DOS TERMÔMETROS TCVC INSTALADOS NA EL. 690,00

4.2.2.2 Termômetros TFOB

Na Figura 46 e Figura 47 são apresentados os resultados de leitura dos termômetros TFOB, cujas alocações estão descritas na Figura 19.

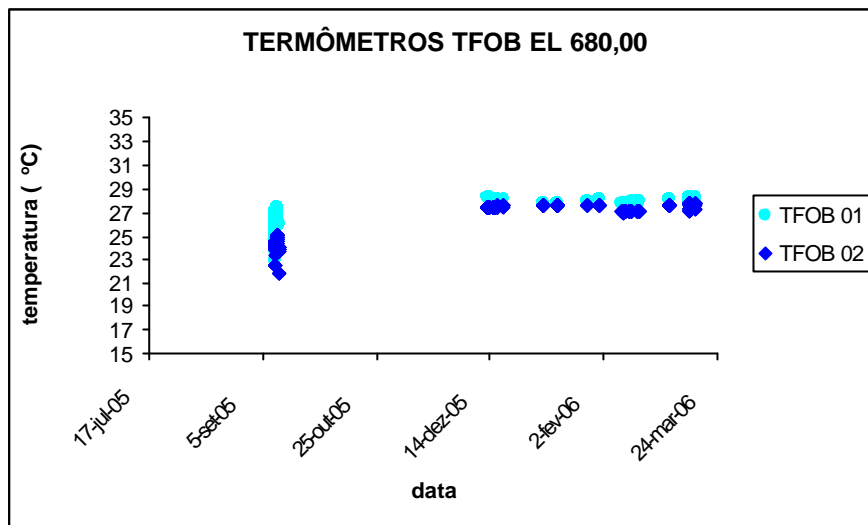


FIGURA 46 - RESULTADOS DE LEITURA DOS TERMÔMETROS TFOB INSTALADOS NA EL. 680,00

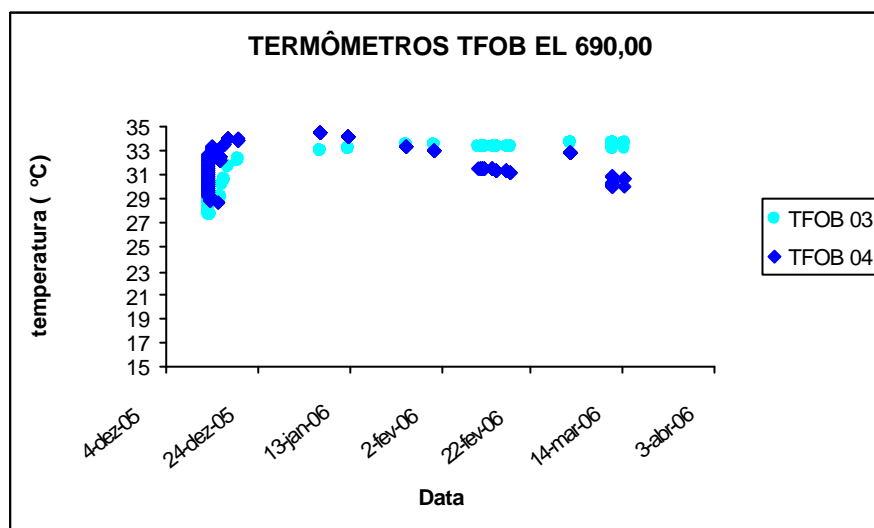


FIGURA 47 - RESULTADOS DE LEITURA DOS TERMÔMETROS TFOB INSTALADOS NA EL. 690,00

Uma vez instalado no mesmo local, o método executivo dos sensores TFOB foi o mesmo utilizado para os sensores TCVC, conforme descrito no item 4.2.1.1.

4.2.2.3 Termômetros TFOR

Na seqüência da Figura 48 à Figura 61, apresenta-se a instalação dos sensores TFOR.



FIGURA 48 - LOCAÇÃO COM TRENA DE LOCAL A SER LANÇADO O CABO TFOR E CRAVAÇÃO DE PREGOS GUIAS



FIGURA 49 - FIXAÇÃO DE ARAME NO PREGO GUIA - TFOR



FIGURA 50 - CRAVAÇÃO FINAL DO PREGO COM O ARAME - TFOR



FIGURA 51 - SITUAÇÃO FINAL DO ARAME DE FIXAÇÃO DOS CABOS TFOR



FIGURA 52 - RETIRADA DA BOBINA DE CABOS TFOR QUE ESTAVA SOBRE A FÔRMA DA FACE DE MONTANTE



FIGURA 53 - ESTICAMENTO DOS CABOS TFOR A PARTIR DA BOBINA



FIGURA 54 - POSICIONAMENTO DOS CABOS TFOR SOBRE OS PREGOS GUIAS E ARAMES DE FIXAÇÃO



FIGURA 55 - FIXAÇÃO DOS CABOS DE FIBRA ÓTICA TFOR COM O ARAME PRESO AO PREGO GUIA

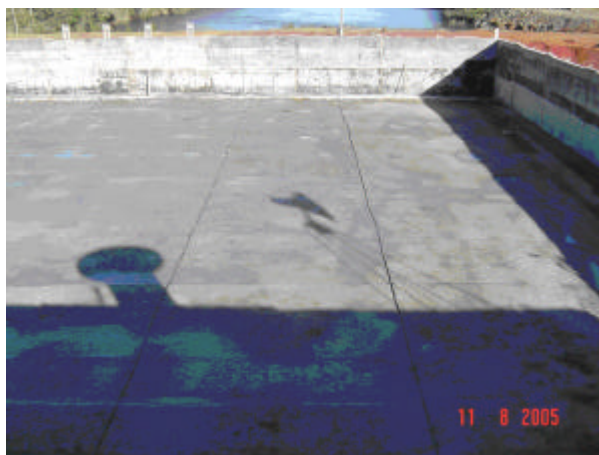


FIGURA 56 - SITUAÇÃO FINAL DOS CABOS DE FIBRA ÓTICA TFOR ESTENDIDOS E FIXADOS SOBRE A PRAÇA



FIGURA 57 - REPOSIÇÃO DA BOBINA DE CABOS TFOR SOBRE A FÔRMA DA FACE DE MONTANTE



FIGURA 58 - APLICAÇÃO DE CCV DE FACE DE MONTANTE SOBRE O CABO DE FIBRA ÓTICA TFOR INSTALADO



FIGURA 59 - APLICAÇÃO DE ARGAMASSA DIRETAMENTE SOBRE O CABO DE FIBRA ÓTICA TFOR



FIGURA 60 - DESCARGA DE CCR SOBRE O CABO DE FIBRA ÓTICA TFOR



FIGURA 61 - ESPALHAMENTO DO CCR SOBRE O CABO DE FIBRA ÓTICA TFOR

Na Figura 62, é apresentado o sistema de leitura dos sensores TFOR.



FIGURA 62 - DETALHE DO SISTEMA DE LEITURA SENSORES TFOR

Das leituras diretas das fibras, foram destacados os trechos que são referentes à barragem, e dispostos espacialmente conforme registros dos nós do cabeamento

previamente conhecidos. Nota-se, na Figura 61, a utilização de referência com água para calibração de eventual fator de correção. O procedimento de calibração consiste em comparar o resultado da leitura da temperatura da água lida nos cabos TFOR com termômetro elétrico de alta precisão. Sendo que eventual fator de correção é aplicado na correção das leituras dos cabos de fibra ótica.

Na seqüência da Figura 63 à Figura 65 são apresentados os campos de temperatura gerados pelas leituras dos termômetros TFOR.

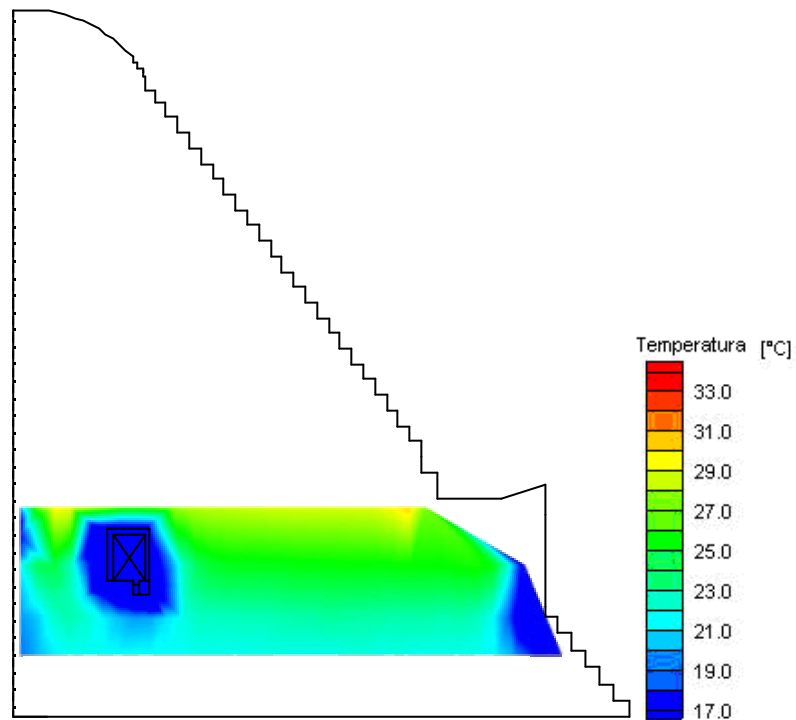


FIGURA 63 - CAMPOS DE TEMPERATURA OBTIDOS DAS LEITURAS DOS TERMÔMETROS TFOR, EM 08/09/05, 19:00 H – PRIMEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÕES

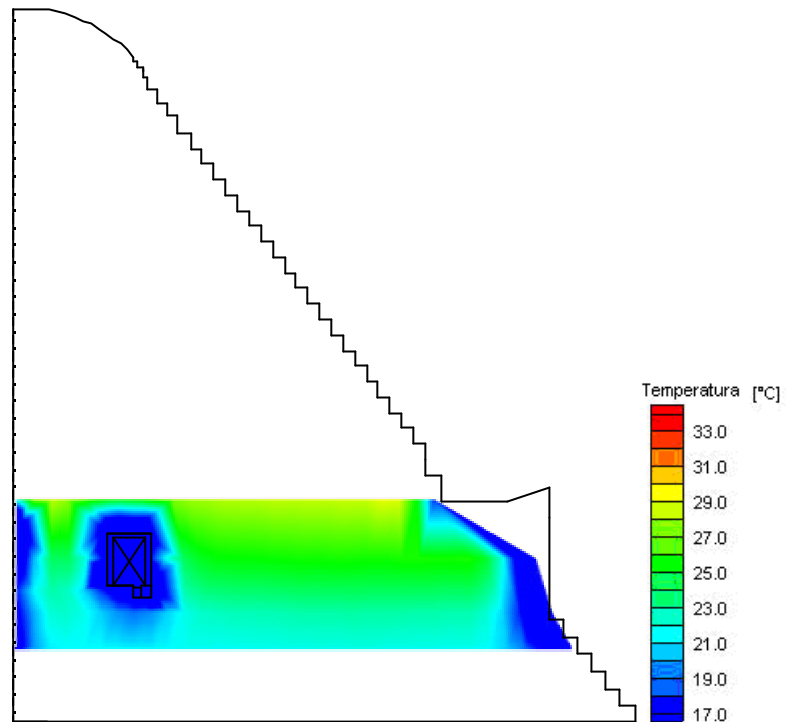


FIGURA 64 - CAMPOS DE TEMPERATURA OBTIDOS DAS LEITURAS DOS TERMÔMETROS TFOR, EM 15/09/05, 16:00 H - PRIMEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÕES

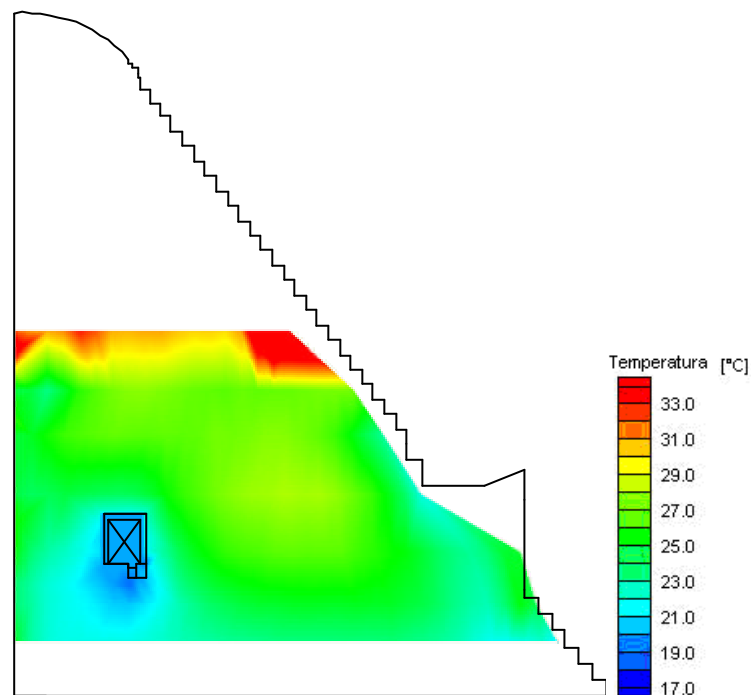


FIGURA 65 - CAMPOS DE TEMPERATURA OBTIDOS DAS LEITURAS DOS TERMÔMETROS TFOR, EM 27/11/05, 21:30 H, DETALHE PARA CAMADA RECÉM LANÇADA ACUSANDO MAIOR TEMPERATURA - SEGUNDA CAMPANHA DE MEDIÇÕES

4.2.3 Análise

4.2.3.1 Comparação TFOB X TCVC

4.2.3.1.1 Comparação das leituras

Na seqüência da Figura 66 à Figura 69 e nas tabelas no Anexo 1, são comparados os desempenhos dos termômetros TFOB e TCVC.

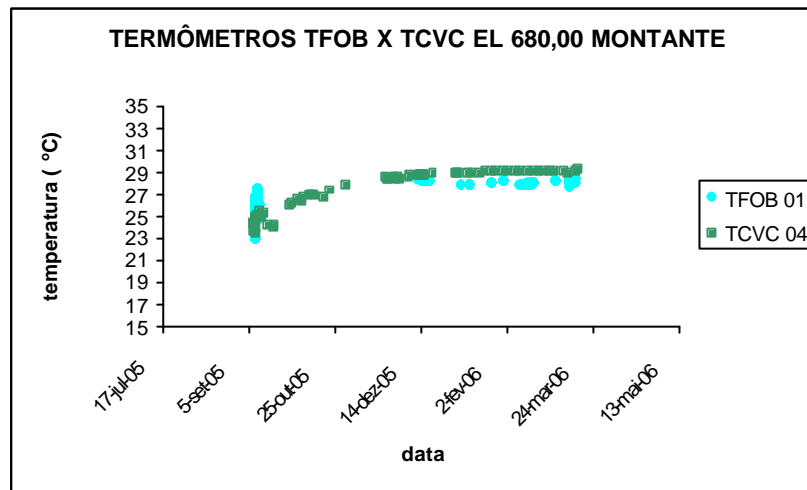


FIGURA 66 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DAS LEITURAS DE TFOB E TCVC EL 680,00 MONTANTE

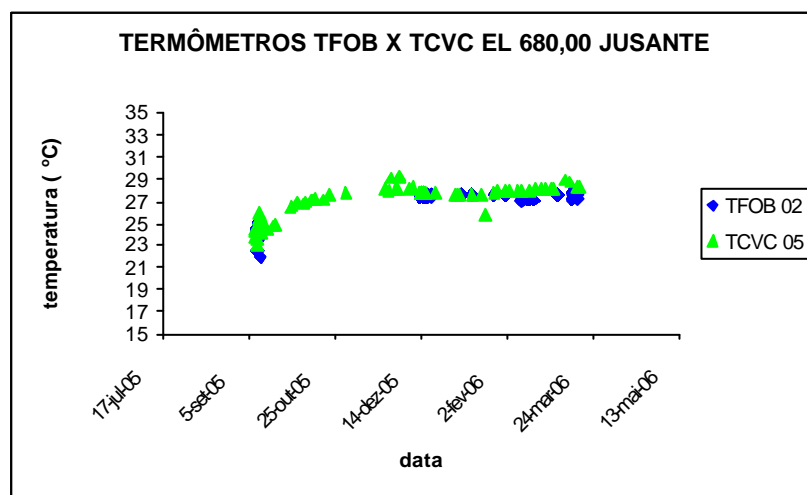


FIGURA 67 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DAS LEITURAS DE TFOB E TCVC EL. 680,00 JUSANTE

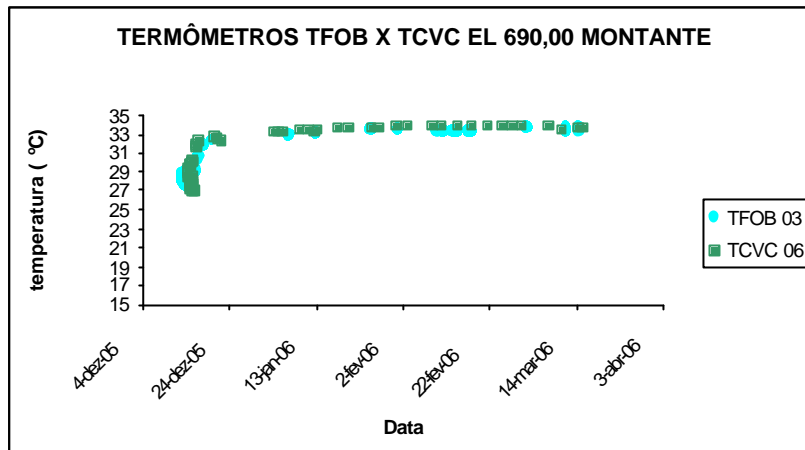


FIGURA 68 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DAS LEITURAS DE TFOB E TCVC EL. 690,00 MONTANTE

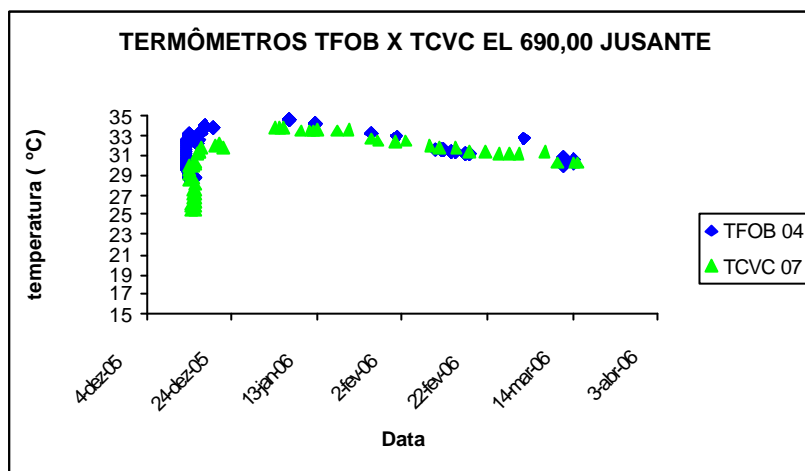


FIGURA 69 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DAS LEITURAS DE TFOB E TCVC EL. 690,00 JUSANTE

Pode se notar que, mesmo com o uso de diferentes sensores em série, há boa correlação entre os valores medidos com os sensores TFOB e TCVC, sendo pequena ($<1^{\circ}\text{C}$), a diferença entre os resultados. Destaca-se também que, apesar de alguns sensores TFOB terem período sem medições, por falta do aparelho de leitura, nota-se que o padrão se repete para as diversas elevações e posições monitoradas.

4.2.3.1.2 Comparação da observação direta de campo

Pode se notar da observação direta de campo do comportamento do TFOB em relação ao TCVC, frente à interação com o processo construtivo e instalação, que:

- para os sensores TFOB, podem ser utilizados em um mesmo cabo mais de um sensor em série, propiciando economia na quantidade de cabos. Para instalar dois sensores TCVC foram necessários dois cabos independentes resultando 25 m para a elevação 680,00 e 45 m para a elevação 690,00. Para instalar dois sensores TFOB foi necessário um cabo apenas resultando 19 m para a elevação 680,00 e 29 m para a elevação 690,00. Destaca-se ainda como vantagem adicional que no mesmo cabo do TFOB foram instalados dois extensômetros na elevação 670,00 e um na elevação 680,00 com o acréscimo de menos de 5 m de cabos, pois o restante do cabeamento, distância até o tubo de descida e deste a galeria, é a mesma dos TFOB. Esta economia também poderia ser expandida para a possibilidade de uso de um tubo de descida menor dado a menor quantidade de cabos ou mesmo descartar o tubo de descida, pois, o cabo dos TFOB é protegido;
- os sensores TFOB possibilitam maior modularidade no campo, dada a facilidade de emenda de topo via elemento de ligação denominado *i-óptico*. Este elemento de ligação consiste em uma seqüência de encaixes mecânicos que permitem adequado alinhamento entre as duas fibras a serem emendadas de modo que a luz que percorre uma fibra passa para a outra sem perda significativa de sinal. Como são adquiridos em módulos, os sensores e cabos TFOB podem ser dispostos como se aprouver no momento da instalação, caso se deseje alterar a posição, basta conectar os cabos e sensores de modo a utilizar da melhor forma o material disponível. Esta facilidade também pode ser aplicada no caso de se desejar dispor de instrumentação não prevista.

Na Figura 70, é apresentado detalhe da emenda dos cabos TFOB.



FIGURA 70 - DETALHE DAS EMENDAS DE CABOS TFOB, UTILIZANDO I-ÓPTICO

- tal flexibilidade é maior que a observada nos aparelhos de corda vibrante, pois para estes últimos nota-se maior complexidade e custo da emenda dos cabos, uma vez que pelos cabos ocorre transmissão de energia. Para o caso do TCVC, apesar da leitura ser procedida via medição de frequência de vibração, é aplicado um sinal de excitação elétrico no momento da leitura o que implica em condução de energia e, pela natureza da operação, na existência de riscos de danos no caso de descargas elétricas ou variações de tensão. Para o caso dos sensores por fibra ótica TFOB o sinal aplicado nos cabos é luz, mais especificamente raio laser.
- em vista dos sensores TFOB terem sido instalados no mesmo local dos sensores TCVC não foi notado diferença em termos de facilidade de instalação dos TFOB a não ser o manuseio de menor número de cabos.

4.2.3.1.3 Comparação de custos

Os custos unitários dos sensores e cabos TFOB e TCVC, conforme item 3.2.3, se equivalem. Nota-se grande vantagem para os TFOB em ocupar menos cabos para mesma quantidade de sensores. Este fato deve-se a possibilidade de ligação em série de sensores utilizando o mesmo cabo. Para os testes realizados, conforme item 4.2.2.1.2, foram utilizados 48 metros de cabos TFOB e 70 metros de cabo TCVC para

os mesmos quatro sensores aplicados nestas duas elevações instrumentadas. Esta redução na quantidade de cabos representou economia direta de cerca de U\$ 200,00, o que representa cerca de 15% de economia no valor total do custos dos 4 sensores e cabos. Esta redução poderia ser maior ainda se fosse levado em conta a possibilidade de utilizar tubulação de passagem de menor diâmetro, dado a menor quantidade de cabos.

O custo do equipamento de leitura dos sensores TFOB foi maior que o dos sensores TCVC, porém esta diferença pode ser facilmente justificada pela diferença na tecnologia embarcada. O leitor dos sensores TFOB possui computador completo, incluindo: monitor, software, visualização gráfica em tempo real, registro e armazenamento de dados de leitura e criação de gráficos, além de permitir entradas para expansão de canais de leitura, acesso aos dados via *Internet*, entre outros. Por outro lado, o leitor de sensores TCVC consiste em mero visor que apresenta o resultado de leitura, sem possibilidade de armazenamento ou transmissão eletrônica. Neste último a leitura obtida no visor é registrada manualmente.

Em vista do exposto e das incertezas inerentes ao levantamento de todos os fatores intervenientes nos custos, pode-se concluir que o custo direto dos dois sensores é compatível, com pequena vantagem para o TFOB, 15%, pelo menor número de cabos. Para os leitores TFOB, o custo direto é maior devido a maior tecnologia embarcada no produto. Este, porém, pode ser diluído no monitoramento de mais de uma obra ou compensado pela redução de custo na mão-de-obra de leitura tanto por evitar o registro manual, como por serem lidos diversos aparelhos em um mesmo cabo. Para os TCVC, a leitura é mais demorada, pois, é necessário conectar e desconectar um cabo para cada sensor.

4.2.3.2 Comparação TFOR x TCVC

4.2.3.2.1 Comparação das leituras

Na seqüência da Figura 67 à Figura 73 são comparados os desempenhos dos termômetros TFOB e TCVC aplicados na elevação 670,00 m.

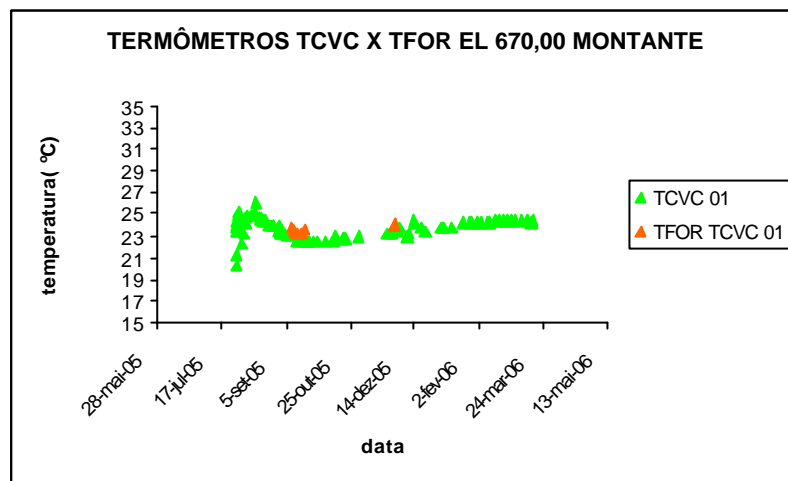


FIGURA 71 - RESULTADOS DE COMPARAÇÃO SENSORES TCVC 01 E TFOR NA POSIÇÃO DO TCVC 01 EL. 670,00 MONTANTE

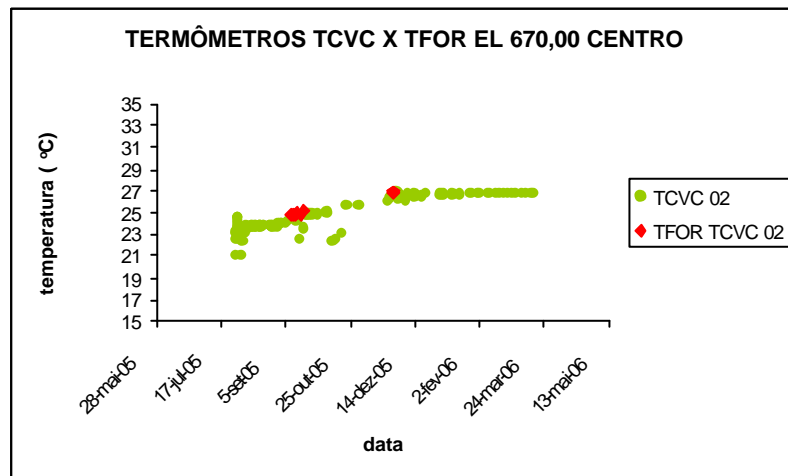


FIGURA 72 - RESULTADOS DE COMPARAÇÃO SENSORES TCVC 02 E TFOR NA POSIÇÃO DO TCVC 02 EL. 670,00 CENTRO

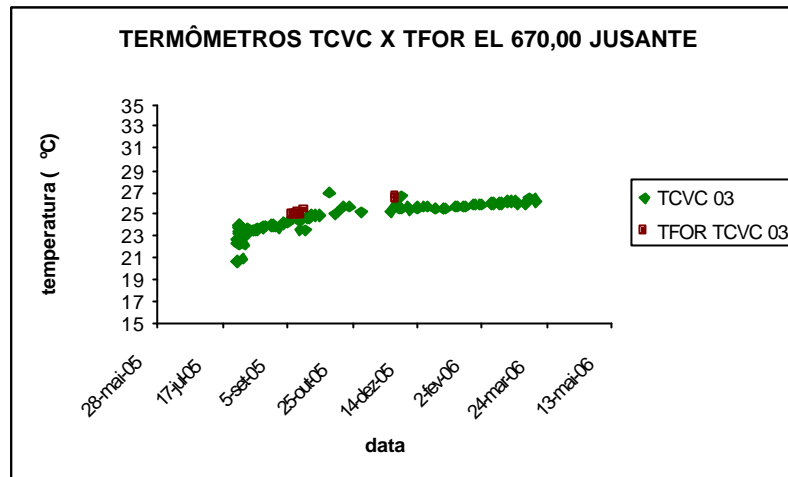


FIGURA 73 - RESULTADOS DE COMPARAÇÃO SENSOES TCVC 03 E TFOR NA POSIÇÃO DO TCVC 03 EL. 670,00 JUSANTE

Na seqüência da Figura 74 à Figura 75 e são comparados os desempenhos dos termômetros TFOR e TCVC aplicado na elevação 680 m.

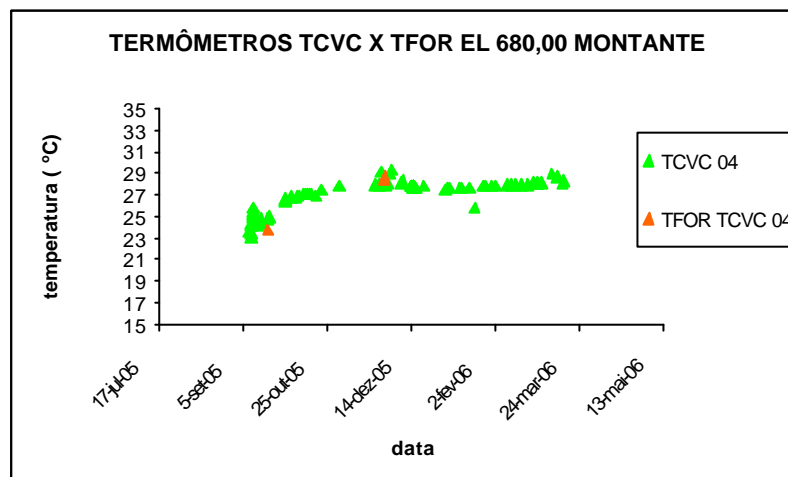


FIGURA 74 - RESULTADOS DE COMPARAÇÃO SENSOES TCVC 04 E TFOR NA POSIÇÃO DO TCVC 04 EL. 680,00 MONTANTE

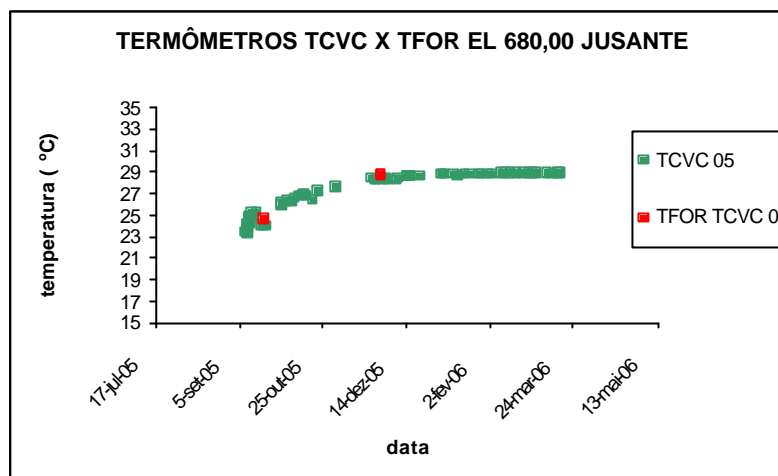


FIGURA 75 - RESULTADOS DE COMPARAÇÃO SENSOES TCVC 05 E TFOR NA POSIÇÃO DO TCVC 05 EL. 680,00 JUSANTE

Pode-se notar total aderência entre os resultados obtidos pelos sensores TFOR e TCVC, o que comprova a eficácia da instrumentação por fibra ótica pelo método distribuído de medição de temperatura, mesmo em comprimentos da ordem de quilômetros. Destaca-se que, apesar das leituras dos sensores TFOR estarem restritas a duas campanhas de medição, o padrão se repete para as diversas elevações e posições monitoradas.

4.2.3.2.2 Comparação da observação direta de campo

Pode se comparar da observação direta de campo, o comportamento do TFOR em relação ao TCVC, frente a interação com o processo construtivo e instalação.

Os sensores TFOR apresentam maior facilidade de instalação, pois, não requerem preparo de *blockouts* e nem aplicação de concreto de proteção sobre os sensores e cabos, como no caso dos sensores TCVC. Para a instalação de uma laçada com cerca de 70 m de cabos de TFOR, ou seja, cerca de 280 sensores, foi gasto em média 30 minutos para esticar e fixar os cabos, proceder o espalhamento cuidadoso do CCR com o trator e compactar com rolo vibratório. Para a instalação de dois sensores de TCVC foram gastas em média cinco horas para aplicar o procedimento indicado

pelo projetista: deixar a forma dos *blockouts* na camada a ser compactada, retirar a fôrma, instalar o sensor, aplicar o concreto de proteção, esperar o concreto adquirir resistência, proceder o espalhamento cuidadoso do CCR com trator e compactar com compactador manual.

As emendas dos cabos TFOR podem ser feitas no campo por pessoal treinado. A vantagem em relação as emendas TCVC é a simplificação do processo já que não conduzirá eletricidade. Na Figura 76 e Figura 77 pode ser observado detalhe da execução de emenda no campo pelo próprio encarregado da leitura, no único caso em que o cabo de medição distribuída foi danificado, ocorrido em período noturno.



FIGURA 76 - EXECUÇÃO DA EMENDA DOS CABOS DE FIBRA ÓTICA TFOR

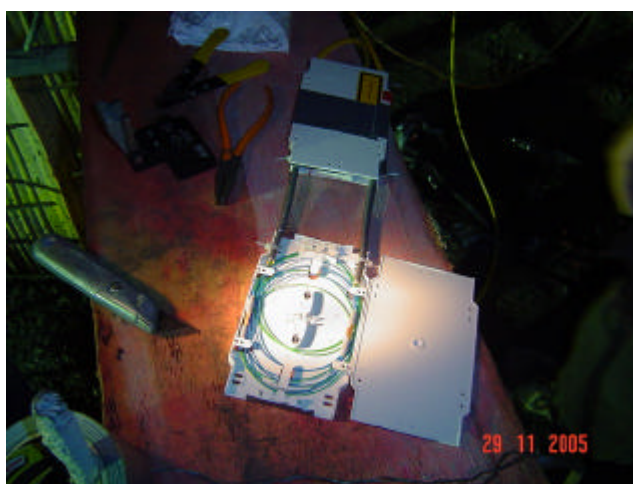


FIGURA 77 - DETALHE DOS CABOS DE FIBRA ÓTICA TFOR EMENDADOS

4.2.3.2.3 Comparação de custos

O custo por sensor instalado é bem menor para o TFOR do que para o TCVC. Para instalar os 900 metros de cabos TFOR na seção instrumentada foram gastos US\$ 3.150,00.

No caso de se comparar a medição com TFOR apenas das seções onde foram instalados os TCVC, pode se concluir que seriam necessários apenas 200m de cabos, ou seja, o custo de US\$ 224,00, que comparado com os US\$ 2.100,00 dos sensores TCVC, resultando em economia de US\$ 1.876,00.

Na análise voltada para uma medição mais distribuída, pode se concluir que esta quantidade de cabos representa a colocação de 2.800 sensores, pois, é inerente ao leitor utilizado obter a cada 25cm uma leitura. Partindo do princípio que seja desejado detectar gradientes térmicos entre jusante e núcleo com esta precisão, pode-se admitir um custo por sensor TFOR de cerca de US\$ 1,12 comparado com os US\$ 300,00 por sensor do TCVC. Em raciocínio inverso pelo mesmo preço de um sensor TCVC poderiam ser instalados 267 sensores TFOR.

Mesmo para medições de gradientes a cada metro, este número continua bastante significativo, pois, o custo dos sensores TFOR passaria para US\$ 4,48 contra os US\$ 300,00 do TCVC ou poderiam ser instalados cerca de 67 sensores TFOR com o custo de um sensor TCVC.

Em uma barragem com significativo número de sensores, como a UHE Salto Caxias, na qual, conforme MUSSI et al. (1999), foram instalados 66 termômetros de corda vibrante, este fator é mais significativo ainda. Aplicando para este exemplo o custo unitário dos TCVC de UHE Fundão, pode-se estimar que seriam necessários US\$ 19.800,00 para adquirir os sensores de corda vibrante de UHE Salto Caxias. A partir das dimensões da barragem instrumentada obtida em MUSSI et al. (1999), pode-se estimar que seriam necessárias cerca de 1.200m de cabos de fibras óticas para cobrir apenas a região monitorada pelos TCVC de projeto. Com isto, aplicando o custo unitário dos sensores TFOR de UHE Fundão, tem-se o valor comparativo de

US\$ 4.200,00, ou seja, US\$ 15.600,00 a menos. Esta economia seria obtida, não obstante o aumento do número de sensores de 66 para 4.800, incrementando a abrangência da instrumentação.

O custo do leitor de TFOR, todavia, é 10 vezes maior que o de TCVC. Porém como pode se ver pela comparação teórica entre TFOR e TCVC, no caso de uma barragem bem instrumentada como Salto Caxias, a vantagem obtida pelo barateamento dos sensores, cerca de US\$ 15.600,00, retorna o investimento da diferença entre os leitores após três barragens similares instrumentadas com TFOR. Isto sem levar em conta os custos indiretos da tecnologia embarcada no leitor TFOR, a prevenção de patologias propiciada pelo aumento de 70 vezes no número de sensores e o aumento da produção do lançamento de CCR com a redução de 90% no tempo de instalação da instrumentação.

Para barragens menores, como por exemplo, de pequenas centrais hidrelétricas, seria necessário um número bastante grande destas para se atingir o retorno do investimento, podendo se considerar a viabilidade apenas no caso de se contratar empresa terceirizada para efetuar a leitura.

Todavia barragens maiores, tal qual a barragem de concreto de UHE Ilha Solteira, onde, conforme CBGB (1996), foram instalados 196 termômetros, podem sozinhas já compensar o investimento no leitor.

Destaca-se, todavia, que conforme ANEEL (2006), as barragens atualmente previstas no Brasil são de menor dimensão que UHE Salto Caxias e UHE Ilha Solteira. Desta forma, a contratação de empresa terceirizada para a leitura, que possa utilizar o aparelho em diversas obras, seria o procedimento mais indicado para implantação da tecnologia no Brasil, atualmente.

4.2.4 Validação Interna

A boa correlação observada entre os sensores testados TFOB e TFOR e os sensores TCVC validam os processos internos utilizados na pesquisa, pois este último seguiu procedimento usual que já era prescrito no projeto original de instrumentação

da barragem UHE Fundão, similar ao de outras barragens (MUSSI et al., 1999).

4.2.5 Validação Externa

A validação externa foi obtida tanto pela boa correlação já citada no item anterior, entre a instrumentação por fibra ótica e a instrumentação convencional de corda vibrante utilizada em outros empreendimentos (MUSSI et al.,1999), como pela participação, no projeto de instalação, leitura, escolha dos instrumentos, de parceiros com experiência comprovada na aplicação de instrumentação por fibra ótica em outras obras (AUFLEGER et al. 2003).

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DE PESQUISA ADOTADO

O método se mostrou adequado para o objetivo do trabalho tendo sido possível acompanhar o comportamento dos processos de projeto, compra, instalação e leitura em escala real na aplicação de instrumentação em uma barragem protótipo.

A aplicação em protótipo foi bastante facilitada pela elaboração de testes prévios em laboratório, que serviram de preparação para o estudo de caso propriamente dito. A decisão de envolver parceiros com vasta experiência em tipos específicos de instrumentação por fibra ótica também tornou mais preciso e ágil o estudo de caso.

5.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS SENSORES DE FIBRA ÓTICA TESTADOS

5.2.1 Sobre os Sensores TFOB

No tocante a durabilidade, pode-se notar da bibliografia consultada, principalmente por KUKUREKA et al. (2005) e INAUDI e GLISIC (2005), a expectativa de durabilidade adequada para o uso em estruturas civis dos sensores de fibra ótica estudados TFOB.

No tocante à precisão, os resultados obtidos com a medição de temperatura utilizando sensores TFOB mostraram que as leituras são coerentes com os TCVC. Como os sensores TCVC já são consagrados pelo uso, vide utilização em Salto Caxias (MUSSI et al.,1999), pode-se afirmar que, para o estudo de caso em questão, foi validada a eficácia dos sensores TFOB na medição da temperatura de barragens de CCR.

No tocante a custos, como descrito no item 4.2.2.2.3, foi observada relativa equivalência entre os custos diretos dos sensores TFOB e TCVC, porém tendo o TFOB a vantagem econômica de 15% na redução da quantidade de cabos. Sendo esta vantagem crescente quanto maior a quantidade de sensores aplicada e o tamanho da barragem, tendendo a compensar na aplicação em mais barragens, a diferença de custos entre os leitores. Na asserção anterior não se levou em conta que a diferença de preços dos leitores é devida a tecnologia embarcada e é compensada pela redução no custo de mão-de-obra de leitura, além de ser mais confiável por evitar o registro manual.

No tocante a abrangência, pode ser concluir do estudo que o sistema TFOB possibilita uma abrangência maior em comparação ao TCVC, pela comprovação da possibilidade de ligação em série de termômetros e extensômetros, sem perder precisão. Esta abrangência também foi propiciada pelo fato de que, com comprimentos relativamente pequenos de cabos, puderam ser colocados sensores adicionais de tipo diferente nos mesmos cabos de instalação dos sensores de temperatura.

No tocante à rapidez e à facilidade de instalação, pode-se concluir que a utilização deste método é compatível com os TCVC, tendo como diferencial favorável observado, a diminuição no tempo de lançamento dos cabos, por serem os instrumentos ligados em série, evitando a aplicação, por exemplo, de espaçadores de cabos.

5.2.2 Sobre os Sensores TFOR

No tocante à durabilidade reitera-se que, com base na bibliografia consultada, principalmente por KUKUREKA et al. (2005) e INAUDI e GLISIC (2005), pode ser esperada grande durabilidade para os sensores de fibra ótica TFOR.

No tocante a precisão, os resultados obtidos com a medição de temperatura utilizando sensores TFOR foram coerentes com os obtidos dos sensores TCVC. Como os sensores TCVC já são consagrados pelo uso, vide utilização em Salto Caxias (MUSSI et al., 1999), pode se afirmar que, para o estudo de caso em questão, foi

validado a eficácia dos sensores TFOR na medição da temperatura de barragens de CCR.

No tocante a custos, como descrito no item 4.2.3.2.3, o estudo indicou que para instrumentar uma barragem com TFOR, passando pelos mesmos pontos medidos com a instrumentação convencional, mesmo com aumento de cem vezes no número de sensores, pode-se reduzir em cerca de 90% no custo direto dos sensores. Sendo que esta economia compensa em poucas obras instrumentadas a diferença de custo dos leitores, especialmente no caso de grandes barragens ou de uso de empresas terceirizadas para leitura, que possam utilizar o leitor em mais barragens.

No tocante à abrangência, tem-se, pelas considerações de precisão e custos citados, que o sistema TFOR possibilitou uma abrangência de leitura extremamente maior, sem perder precisão ou aumentar o custo direto, pois, com o preço de um sensor TCVC poderiam ser instalados 267 sensores TFOR. Esta maior abrangência das leituras tende a propiciar melhor visualização das características do CCR, permitindo tomadas de decisão com melhor segurança no que diz respeito a melhor análise térmica, durante e após o período construtivo, em comparação a instrumentação convencional, possibilitando também melhores modelagens térmicas e portanto melhores projetos para barragens futuras.

Com relação à rapidez e à facilidade de instalação, pode-se concluir que a utilização deste método tornou mais rápida e fácil a instalação da instrumentação, reduzindo de cinco horas para trinta minutos, cerca de 90% a menos, o tempo de instalação nas elevações instrumentadas, contribuindo para a produção no lançamento de CCR.

5.3 CONCLUSÕES GERAIS SOBRE SENSORES DE FIBRA ÓTICA

Pelas conclusões obtidas no item 5.2, pode-se afirmar que o uso instrumentação por fibra ótica pelo método de medição distribuída de temperatura TFOR propicia uma definição mais abrangente da distribuição de temperatura em

barragens de CCR, por meio da execução de medidas múltiplas, com diminuição de custos a curto prazo e com maior rapidez de instalação. Pode se afirmar também que a instrumentação por fibra ótica utilizando redes de Bragg, TFOB, propicia o uso de diferentes tipos de instrumentos em série em um mesmo cabo, possibilitando um custo marginal menor e um monitoramento mais abrangente das múltiplas características do CCR.

Com base na revisão bibliográfica, pode-se verificar, também, que é possível medir a deformação utilizando sistemas de medição por fibra ótica de maneira abrangente, permitindo no conhecimento desta característica do concreto e sua relação com a temperatura. A análise comparativa da medição de temperatura e deformação tem potencial para propiciar o controle sobre a ultrapassagem do ponto de tensão zero e o risco de fissuração ao longo de todo o bloco instrumentado da barragem.

5.4 CONCLUSÃO FINAL

Pode se afirmar, com base nas medições e efetuadas, e interpretação restrita a análise de temperatura no protótipo em questão, que o uso da instrumentação por fibra ótica propicia conhecimento mais abrangente sobre a distribuição de temperatura em maciços de CCR, que as demais mostradas e estudadas. Da mesma forma, com base na revisão bibliográfica efetuada, pode se indicar que esta conclusão também pode ser extrapolada para outros tipos de medição, em especial da deformação. Assim sendo, a dissertação responde com afirmação positiva a hipótese que gerou o estudo, assim como no decorrer da mesma foi possível efetivamente comprovar que o uso desta nova ferramenta contribuiu efetivamente para a resolução do problema da pesquisa, ou seja, com a mesma precisão dos instrumentos convencionais, propicia o conhecimento mais abrangente das características das barragens de CCR. Este conhecimento permite tanto a adoção de medidas preventivas no sentido de evitar fissuras térmicas, como no sentido de entender melhor esta patologia. Destaca-se também que além desta definição mais abrangente da distribuição de temperatura em maciços de CCR, o

estudo indicou que a instrumentação por fibra ótica teve maior rapidez de instalação, assim como indicação de diminuição de custos a médio prazo, especialmente no caso de contratação de empresa terceirizada para leitura. Da pesquisa bibliográfica, KUKUREKA et al. (2005), indica também durabilidade compatível com estruturas civis.

Destaca-se que as conclusões desta dissertação baseiam-se exclusivamente no material disponível no levantamento bibliográfico e os resultados obtidos no estudo de caso efetuado, sendo, portanto, restritas ao escopo estudado. Considerações sobre similaridade ou extrapolações para outras aplicações deverão ser precedidas de estudos prévios para os casos específicos, dependendo de fatores como: altura da barragem, preços comerciais praticados, entre outros.

5.5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seria muito interessante que fosse feito acompanhamento da construção de uma barragem desde a primeira camada fazendo leituras ininterruptamente com o leitor do TFOR.

O acompanhamento da construção utilizando esta ferramenta permitirá analisar a formação de gradientes térmicos rapidamente, assim como sua alteração no tempo.

Neste acompanhamento poderá ser detectado, por exemplo, a formação em pequeno intervalo de tempo de gradientes inesperados que podem ultrapassar os limites previstos no projeto. Uma vez estudados estes comportamentos podem ser controlados, por exemplo, por medidas operacionais de campo, tais como: diminuição da velocidade de lançamento, proteção térmica das faces de montante ou de jusante, entre outros.

Outra proposta é que sejam feitos estudos da aplicação do método distribuído Brillouin e método multiplexado redes de Bragg na medição da deformação, visando detectar comportamentos de deformação devidos a fenômenos térmicos e estruturais.

Este estudo teria resultados mais efetivos ainda, se fosse aplicado em conjunto em um mesmo protótipo o método distribuído Raman de medição de temperatura, elaborando comparação cruzada entre deformação e temperatura em cada ponto estudado.

Sugere-se também que as medições sejam acompanhadas de modelagem por métodos numéricos.

A aplicação em protótipos para verificação da detecção de percolação é outra sugestão, assim como a continuidade da aplicação em protótipos da medição da temperatura para criação de banco de dados que permita generalizar as conclusões obtidas e buscar provar que o uso de instrumentação por fibra ótica é fundamental para a redução de custos futuros de manutenção de barragens além de contribuir para a redução do custo da sua construção.

Finalmente, são encorajados estudos sobre a possibilidade de usar instrumentação com fibras óticas em ensaios laboratoriais, principalmente os que envolvam medição de temperatura e deformação, tal qual coeficiente de dilatação térmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br>>. Acesso em 02 mai. 2006.

ANDRADE, W.; BITTENCOURT, R; BATISTA, E.; GRAÇA, N. Brazilian experience of roller compacted concrete (RCC). In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS**, 4., 2003, Madrid. Proceedings... Lisse: A.A Balkema Publishers, 2003, p. 267-272.

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

ANDRIOLO, F.R. **The Use of Roller Compacted concrete**, São Paulo: Oficina de texto, 1998.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em 02 mai. 2006

ANSARI, F. State-of-the-art in the Applications of Fiber-Optics Sensors to Cementitious Composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 3-19, 1997.

AUFLEGER, M.; CONRAD, M; STROBL, T.; MALKAWI, A.I.H; DUAN, Y. Distributed Fiber Optic Temperature Measurement in RCC-Dams in Jordan and China. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS**, 4., 2003, Madrid. Proceedings... Lisse: A.A Balkema Publishers, 2003, p. 401-407.

AUFLEGER, M.; DORNSTAEDLER, J.; STROBL, T. Fibre optic temperature measurements for dam monitoring. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON DAM SAFETY AND MONITORING**, 1., 1999, TGP Job site. Proceedings... China Book Press, 1999, p. 729-735.

AUFLEGER,M.; CONRAD,M.; PERZLMAIER,S.; PORRAS,P.; STROBL,T. Distributed Fibre Optics Temperature Measurement on it way to become an ordinary tool in Dam Monitoring.**Hydro Review Worldwide**, v. 13, HCI Publications, Kansas City, USA, 2005.

BERNINI, R.; MINARDO, A.; ZENI, L. High resolution distributed fiber-optic frequency domain brillouin sensing. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBER SENSORS**, 17., 2005, Brugges. Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering, 2005, p. 575-578.

CBGB. Auscultação e instrumentação de barragens no Brasil. In: **SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS**, 2. , 1996, Belo Horizonte. Anais... Édile Serviços gráficos, 1996, v. 1, p. 1-123.

CBGB. **Barragens no Brasil**. São Paulo: Novo Grupo editora técnica ltda, 1982.

CBGB. **Concreto Massa no Brasil:memória técnica**. Rio de Janeiro: Memória da Eletricidade, 1989.

CBGB. **Main Brazilian Dams**. São Paulo: Bcold Publications Comitee, 1982.

CHEN, J.;BOCK,W. J. A novel Fiber-Optics Pressure Sensor Operated at 1300-nm Wavelength. **IEEE transactions on instrumentation and Measurement**, v. 53, Feb. 2004

CHOQUET, P.; JUNEAU, F., BESSETE, J. New generation of Fabry-Perot fiber optics sensors for monitoring of structures. In: **SPIE CONFERENCE ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS**, 2000, Newport Beach, USA.

CLARK, P.; BORINSKI, J.; GUNTHER, M.; POLAND, S.; WIGENT, D.; WATKINS, S. Modern Fiber Optics Sensors. **Smart Materials Bulletin**, p. 8-11, June. 2001.

DAVIS, M. A.; BELLEMORE, D. G.; KERSEY, A. D. Distributed Fiber Bragg Grating Strain Sensing in Reinforced Concrete Structural Components. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 45-57, 1997.

DONGJIE, Y.; XISHENG, H; TENG, H. The datum and optimization of dam safety monitoring system. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON DAM SAFETY AND MONITORING**, 1., 1999, TGP Job site. Proceedings... China book press, 1999, p. 656-660.

DUNSTAN, M. R. H. The State-of-the-art of RCC Dams in 2003-An update of ICOLD bulletin 125. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS**, 4., 2003, Madrid. Proceedings... Lisse: A.A Balkema Publishers, 2003, p. 39-48

ELETROBRÁS. **Eletróbrás: 40 anos**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2002.

GLISIC, B.; INAUDI, D.; KRONENBERG, P.; VURPILLOT, S. Dam monitoring using Long SOFO Sensor.In: **HYDROPOWER**, 1999, Gmunden, Austria.

GLISIC, B.; SIMON, N. Monitoring of concrete at very early age using stiff SOFO sensor.**Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 115-119, 2000.

GLOBALSPEC. About LVDT Linear Position Sensors. New York, USA, 2002. **Catálogo de produto**.

GROSSWIG, S.; HURTIG, E.; LUEBBECKE, S; VOGEL, B. Pipeline detection using distributed fibre optical temperature sensing. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBER SENSORS**, 17., 2005, Brugges. Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering, 2005, p. 226-229.

HABEL, W. R. ;HOFMANN, D.; HILLEMEIER, B. Deformation Measurements of Mortars at Early Ages of Large Concrete Components on Site by Means of Embedded Fiber Optic Microstrain Sensors.**Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 81-102, 1997.

INAUDI, D.; GLISIC, B. Development of distributed strain and temperature sensing cables. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBER SENSORS**, 17., 2005,

Brugges. Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering, 2005, p. 222-225.

JOHANSSON,S.; WATLEY,D. Optical Allusions. **International Water Power & Dam Construction**, p. 22-25, Jan 2005.

JUNEAU, F; CHOQUET, P.; Reliability, long-term stability and gage performance of vibrating wire sensors with reference to case histories._____, 2002.

KOGA, H.; KATAHIRA, H.; KAWANO, H. Thermal measurement and analysis of large roller compacted concrete dams. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS**, 4., 2003, Madrid. Proceedings... Lisse:A.A Balkema Publishers, 2003, p. 1139-1148.

KRONENBERG, P.; CASANOVA, N.; INAUDI, D.; VURPILLOT, S. Dam monitoring with fiber optics deformation sensors. In: **SPIE CONFERENCE ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS**, 1997, San Diego,USA.

KUKUREKA, S.; MIAO, P.; METJE, N; CHAPMAN, D.; ROGERS, C. Mechanical reliability of optical fiber sensors for tunnel displacement monitoring. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBER SENSORS**, 17., 2005, Brugges. Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering, 2005, p. 1052-1055.

LEVIS, P.; SOARES, M; ANDRADE, J. Behaviour of Jordão RCC dam - 3 years. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON DAM SAFETY AND MONITORING**, 1., 1999, TGP Job site. Proceedings... China book press, 1999, p. 265-270.

MARQUES FILHO, J. **Maciços experimentais de laboratório de concreto compactado com rolo aplicado as barragens**. Porto Alegre, 2005. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo: Pini, 1994.

MICHIE, W. C.; CULSHAW, B.; McLEAN, A.; KONSTANTAKI, M.; HADJILOUCAS, S. Distributed Water Ingress and Water Potential Measurements using Fiber Optics. **Cement and Concrete Composites**, v.19, p. 35-44, 1997.

MILES, M. B.; HUBERMAN, A. M. **Qualitative data analysis**. 6.ed. Beverly Hills: Sage Publications, 1987.

MOSER, D; STEFFEN, R; BRITTO, R.; MUSSI, J. Quality Control RCC of Dona Francisca Dam. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS**, 4., 2003, Madrid. Proceedings... Lisse: A.A Balkema Publishers, 2003, p. 1013-1020.

MUSSI, J.; MOSER, D; OLIVEIRA, L. Monitoring Systems of Salto Caxias Hydroelectric Powerplant. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON DAM SAFETY AND MONITORING**, 1., 1999, TGP Job site. Proceedings... China book press, 1999, p. 625-629.

OLIVEIRA, S. L. **Tratado de Metodologia Científica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2001.

PARKER, T.; FARHADIROUSCHAN, M.; HANDEREK, V.; ROGERS, A. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter. **IEEE Photonics Technology Letters**, vol 9, n. 7, p. 979-981, 1997.

PEREIRA, P.; KUPERMAN, S. Características de concretos massa e estrutural, utilizando, cimento Portland pozolânico. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 44, 2002, Belo Horizonte. Anais... Ibracon: Instituto Brasileiro do concreto, 2002, III-042.

PINTO, N. Cenários futuros para a Engenharia de barragens. In: **SEMINÁRIO SOBRE O FUTURO DA ENGENHARIA DE BARRAGENS**, 1., 1997, Curitiba: CBGB-NRP, 1997, p.61-65.

POLOSSO, T. Fiber Bragg gratings optical sensing technology. **Smart Materials Bulletin**, p. 7-10, Sep. 2001.

RAN, Z.; RAO, Y.; NIE, N.; CHEN, R. Long distance fiber Bragg grating sensor system based on hybrid Raman/erbium-doped fiber amplification. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBER SENSORS**, 17., 2005, Brugges. Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering, 2005, p. 583-586.

ROBSON, C. **Real world research : a resource for social scientists and practitioner**. Oxford: Blackwell, 1993.

ROSSO, J.; PIASENTIM, C. Critérios usados no projeto de auscultação da barragem de Itaipú e sua reavaliação com base no desempenho da instrumentação. In: **SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS**, 2., 1996, Belo Horizonte. Anais... Édile Serviços gráficos, 1996, v. 2, p. 33-42.

SENSA. Laser Measure Device. London, England, 2002. **Catálogo de produto**.

SLOWIK, V.; SCHLATTNER, E.; KLINK, T. Fiber Bragg Grating Sensor in Concrete Technology In: **LACER**, 3, Leipzig, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, 1998.

SOARES, M.; LEVIS, P.; SEARA, R.; FERREIRA, E.; TERRES, J. Seepage and treatment of cracks in Salto Caxias Dam. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS**, 4., 2003, Madrid. Proceedings... Lisse: A.A Balkema Publishers, 2003, p. 1185-1192.

VEIGA, F.; GONÇALVES, I.; ARMELIN, J. ANDRADE, N. Reação alcali-agregado: a utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura na identificação de seus produtos. In: **SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ALCALI AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO**, 1., 1997, Goiânia. Anais... Ibracon: Instituto Brasileiro do concreto, 1997, p. 13-20.

WANG, C.; ZHOU, Z.; HU, Q.; OU, J. Construction control of mass concrete of Nanjing 3rd Yangtze bridge using FRP-packaged FBG sensors. In: **INTERNATIONAL**

CONFERENCE ON OPTICAL FIBER SENSORS, 17., 2005, Brugges. Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering, 2005, p. 1012-1015.

WATKINS, S. E. Smart Bridges with fiber-optic Sensors. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, p. 25-30, June 2003.

YEO, T.; ECKSTEIN, D.; MCKINLEY, B; BOSWELL, L.; GRATTAN, K. Fibre-optic sensor for the monitoring of moisture ingress and porosity of concrete. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBER SENSORS**, 17., 2005, Brugges. Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering, 2005, p. 491-494.

YIN, Robert K. **Case study research: design and methods**. 2.ed. Applied Social Research Methods Series, Volume 5, Sage Publications, 1994.

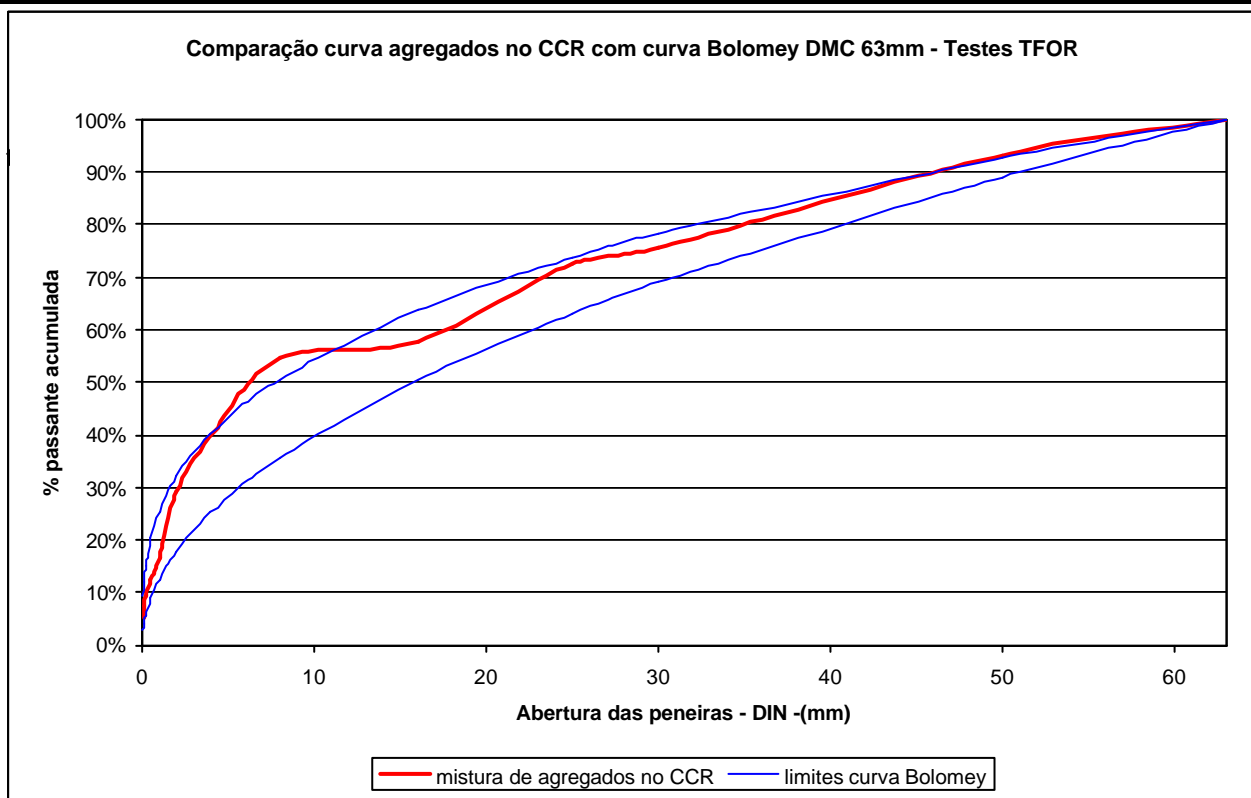
ZOU, L.; BAO, X.; WAN, Y.; RAVET, F; CHEN, L. Distributed fiber brillouin strain and temperature sensor with centimeter spatial resolution by coherent probe-pump technique. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBER SENSORS**, 17., 2005, Brugges. Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering, 2005a, p. 68-71.

ZOU, L.; BAO, X.; RAVET, F; CHEN, L.; ZHOU, J.; ZIMMERMANN, T. Distributed fiber strain sensor based on brilloiun scaterring for inspection of pipeline buckling. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBER SENSORS**, 17., 2005, Brugges. Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering, 2005b, p. 571-574.

ANEXO 01 – INFORMAÇÕES ADICIONAIS

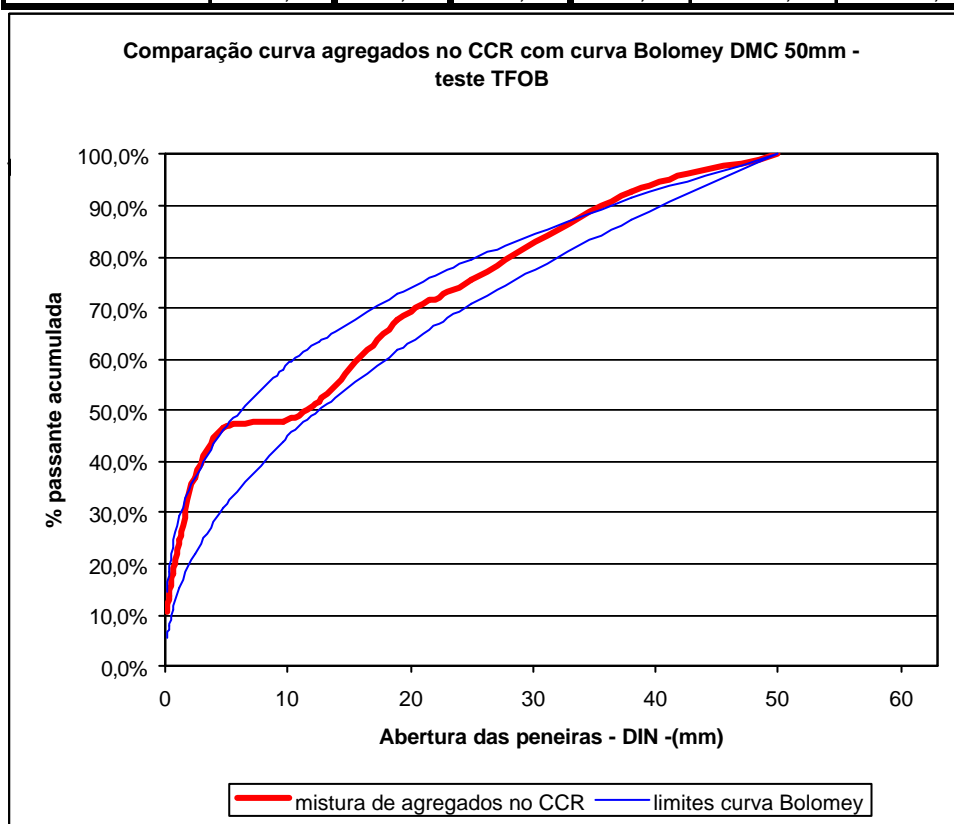
AGREGADOS UTILIZADOS NA MISTURA DE CCR –TESTE TFOR

agregados individuais	brita 63 mm	brita 50 mm	brita 16 mm	areia média	areia fina	pó de quartzo	agregados na mistura CCR		
% utilizada em peso	13,0%	30,5%	15,8%	18,0%	18,0%	4,7%			
diâmetro peneiras(mm)	% retida	% retida	% retida	% retida	% retida	% retida	%retida	%retida acumulada	%passante acumulada
63	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100%
50	51,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,7%	6,7%	93%
30	48,2%	37,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	17,7%	24,5%	76%
25	0,0%	9,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,0%	27,4%	73%
16	0,0%	48,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	14,8%	42,2%	58%
8	0,0%	4,1%	12,5%	0,0%	0,0%	0,0%	3,2%	45,5%	55%
4	0,0%	0,0%	86,4%	5,0%	1,2%	0,0%	14,8%	60,2%	40%
2	0,0%	0,0%	1,1%	48,3%	9,6%	0,0%	10,6%	70,8%	29%
1	0,0%	0,0%	0,0%	44,0%	25,3%	0,0%	12,5%	83,3%	17%
0,5	0,0%	0,0%	0,0%	2,8%	20,5%	0,0%	4,2%	87,5%	13%
0,2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	17,7%	0,0%	3,2%	90,7%	9%
0,1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,9%	0,0%	2,0%	92,7%	7%
0,05	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,8%	0,0%	1,9%	94,6%	5%
fundo	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,9%	100,0%	5,4%	100,0%	0%



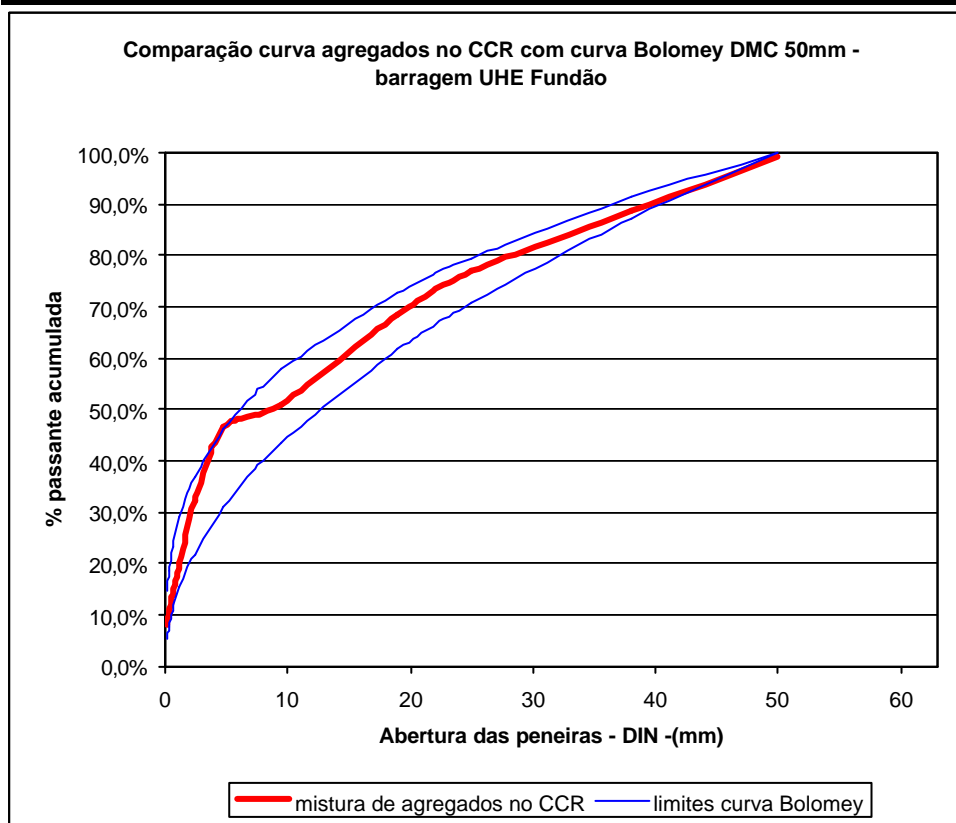
AGREGADOS UTILIZADOS NA MISTURA DE CCR –TESTE TFOB

Agregados individuais	brita 50 mm	brita 25 mm	areia artificial	agregados na mistura CCR		
% utilizada em peso	27,0%	27,0%	46,0%			
% <0,075mm após lavagem	1,4%	3,2%	19,4%			
diâmetro peneiras(mm)	% retida	% retida	% retida	%retida	%retida acumulada	%passante acumulada
50	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
38	27,0%	0,0%	0,0%	7,3%	7,3%	92,7%
25	64,0%	0,0%	0,0%	17,3%	24,6%	75,4%
19	9,0%	20,0%	0,0%	7,8%	32,4%	67,6%
12,5	0,0%	59,0%	0,0%	15,9%	48,3%	51,7%
9,6	0,0%	14,0%	0,0%	3,8%	52,1%	47,9%
4,8	0,0%	5,0%	0,0%	1,4%	53,5%	46,5%
2,4	0,0%	0,0%	21,0%	9,7%	63,1%	36,9%
1,2	0,0%	0,0%	26,0%	12,0%	75,1%	24,9%
0,6	0,0%	0,0%	15,0%	6,9%	82,0%	18,0%
0,3	0,0%	0,0%	9,0%	4,1%	86,1%	13,9%
0,15	0,0%	0,0%	7,0%	3,2%	89,4%	10,6%
fundo	0,0%	2,0%	22,0%	10,7%	100,0%	0,0%



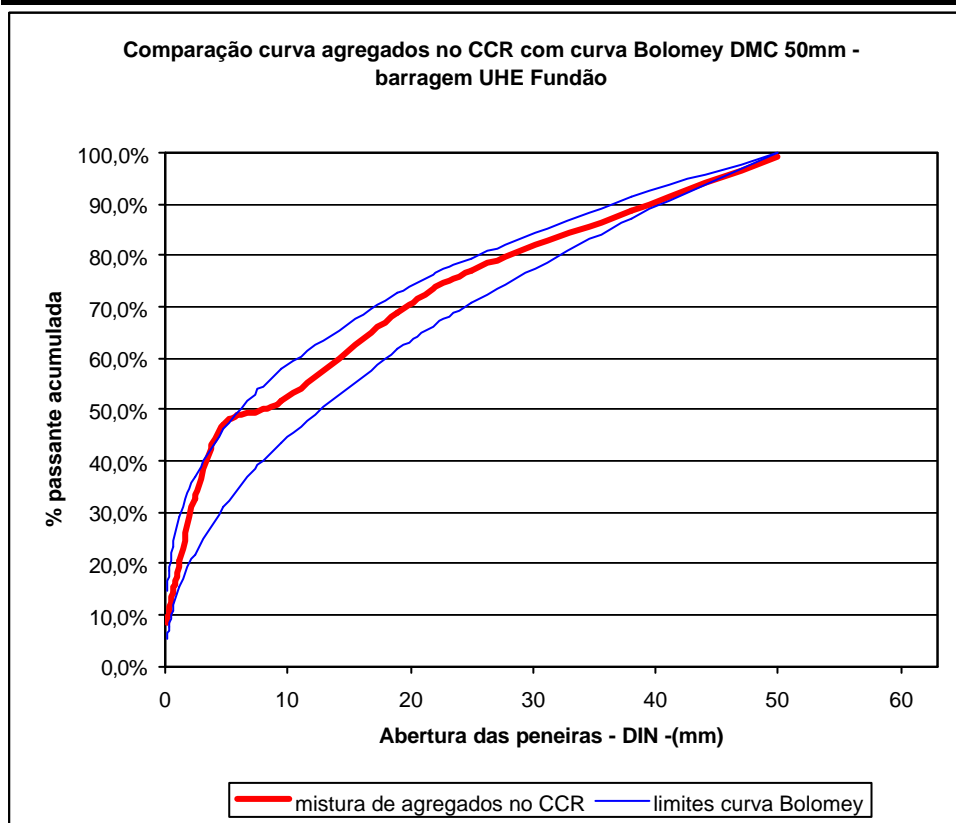
AGREGADOS UTILIZADOS NA MISTURA CCR 125 – BARRAGEM UHE FUNDÃO

agregados individuais	brita 50 mm	brita 25 mm	areia artificial	agregados na mistura CCR		
% utilizada em peso	26,0%	26,0%	48,0%			
% <0,075mm após lavagem	0,5%	1,1%	17,5%			
diâmetro peneiras(mm)	% retida	% retida	% retida	%retida	%retida acumulada	%passante acumulada
76	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
50	3,0%	0,0%	0,0%	0,8%	0,8%	99,2%
38	41,0%	0,0%	0,0%	10,7%	11,4%	88,6%
25	44,0%	1,0%	0,0%	11,7%	23,1%	76,9%
19	12,0%	20,0%	0,0%	8,3%	31,5%	68,5%
9,5	0,0%	67,0%	0,0%	17,4%	48,9%	51,1%
4,8	0,0%	10,0%	4,0%	4,5%	53,4%	46,6%
2,4	0,0%	0,0%	30,0%	14,4%	67,8%	32,2%
1,2	0,0%	0,0%	25,0%	12,0%	79,8%	20,2%
0,6	0,0%	0,0%	13,0%	6,2%	86,0%	14,0%
0,3	0,0%	0,0%	7,0%	3,4%	89,4%	10,6%
0,15	0,0%	0,0%	5,0%	2,4%	91,8%	8,2%
fundo	0,0%	2,0%	16,0%	8,2%	100,0%	0,0%



AGREGADOS UTILIZADOS NA MISTURA CCR 126 – BARRAGEM UHE FUNDÃO

agregados individuais	brita 50 mm	brita 25 mm	areia artificial	agregados na mistura CCR		
% utilizada em peso	25,7%	25,7%	48,6%			
% <0,075mm após lavagem	0,5%	1,1%	17,5%			
diâmetro peneiras(mm)	% retida	% retida	% retida	%retida	%retida acumulada	%passante acumulada
76	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
50	3,0%	0,0%	0,0%	0,8%	0,8%	99,2%
38	41,0%	0,0%	0,0%	10,5%	11,3%	88,7%
25	44,0%	1,0%	0,0%	11,6%	22,9%	77,1%
19	12,0%	20,0%	0,0%	8,2%	31,1%	68,9%
9,5	0,0%	67,0%	0,0%	17,2%	48,3%	51,7%
4,8	0,0%	10,0%	4,0%	4,5%	52,8%	47,2%
2,4	0,0%	0,0%	30,0%	14,6%	67,4%	32,6%
1,2	0,0%	0,0%	25,0%	12,2%	79,6%	20,4%
0,6	0,0%	0,0%	13,0%	6,3%	85,9%	14,1%
0,3	0,0%	0,0%	7,0%	3,4%	89,3%	10,7%
0,15	0,0%	0,0%	5,0%	2,4%	91,7%	8,3%
fundo	0,0%	2,0%	16,0%	8,3%	100,0%	0,0%



TEMPERATURA DO CCR NO LANÇAMENTO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO DIA-
BARRAGEM UHE FUNDÃO – EL 702,8 A 690,8

TEMPERATURAS DO CCR NO LANÇAMENTO NO BLOCO 11 E CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO DIA					
DATA	ELEVAÇÃO	HORA	CCR	U.REL.	INSOLAÇÃO
			TEMP(°C),	AR (%)	
21/02/06	702,8	15:09	31,0	80,0%	CHUVA
20/02/06	702,5	20:23	28,0	77,0%	NUBLADO
20/02/06	702,2	15:30	31,0	70,0%	NUBLADO
18/02/06	701,9	05:04	26,0	78,0%	NUBLADO
18/02/06	701,6	02:24	27,0	78,0%	NUBLADO
17/02/06	701,3	15:36	30,0	53,0%	BOM
16/02/06	701,0	00:10	27,0	67,0%	BOM
16/02/06	700,7	11:31	30,0	81,0%	NUBLADO
16/02/06	700,4	10:07	28,0	72,0%	NUBLADO
13/02/06	700,1	12:03	30,0	52,0%	BOM
13/02/06	699,8	10:34	27,0	70,0%	BOM
11/02/06	699,8	11:40	28,0	53,0%	NUBLADO
11/02/06	699,2	10:04	27,0	58,0%	BOM
10/02/06	698,9	14:00	30,0	53,0%	BOM
10/02/06	698,6	11:41	30,0	57,0%	BOM
08/02/06	698,3	18:33	30,0	68,0%	NUBLADO
08/02/06	697,7	14:45	32,0	54,0%	BOM
07/02/06	697,4	15:14	31,0	66,0%	BOM
07/02/06	697,1	12:20	30,0	60,0%	BOM
07/02/06	696,8	11:01	27,0	61,0%	NUBLADO
03/02/06	695,6	14:30	34,0	76,0%	BOM
10/01/06	695,6	23:35	28,0	81,0%	NUBLADO
03/02/06	695,3	13:40	34,0	84,0%	BOM
10/01/06	695,3	21:58	30,0	N/D	NUBLADO
02/02/06	695,0	11:45	30,0	70,0%	BOM
10/01/06	695,0	20:09	30,0	N/D	BOM
05/01/06	694,7	22:40	26,0	N/D	N/D
05/01/06	694,1	17:34	28,0	N/D	N/D
05/01/06	693,8	03:10	27,0	N/D	N/D
04/01/06	693,5	23:45	28,0	N/D	N/D
04/01/06	693,2	21:19	33,0	N/D	N/D
21/12/05	692,9	05:50	24,0	N/D	NUBLADO
21/12/05	692,6	04:27	26,0	N/D	NUBLADO
21/12/05	692,3	02:45	26,0	N/D	NUBLADO
20/12/05	692,0	11:14	26,0	N/D	NUBLADO
20/12/05	691,7	09:05	23,0	N/D	NUBLADO
20/12/05	691,4			82,0%	NUBLADO
15/12/05	691,1	22:45	24,0	N/D	BOM
15/12/05	690,8	21:20	27,0	N/D	BOM

N/D = NÃO DISPONÍVEL

TEMPERATURA DO CCR NO LANÇAMENTO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO DIA-
BARRAGEM UHE FUNDÃO – EL 690,5 A 667,7

TEMPERATURAS DO CCR NO LANÇAMENTO NO BLOCO 11 E CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO DIA					
DATA	ELEVAÇÃO	CCR		U.REL. AR (%)	INSOLAÇÃO
		HORA	TEMP.		
15/12/05	690,5	17:57	28,0	N/D	SOL
10/12/05	690,2	02:44	24,0	N/D	NUBLADO
10/12/05	689,9	23:05	26,0	N/D	NUBLADO
10/12/05	689,6	21:00	26,0	85,0%	NUBLADO
01/12/05	689,3	14:10	28,0	N/D	SOL
01/12/05	689,0	12:30	29,0	N/D	SOL
01/12/05	688,7	11:49	29,0	N/D	SOL
29/11/05	688,4	21:58	25,0	N/D	BOM
29/11/05	688,1	17:05	25,0	N/D	SOL
24/11/05	687,5	08:25	24,0	N/D	SOL
24/11/05	687,2	03:46	23,0	N/D	BOM
24/11/05	686,9	11:25	25,0	N/D	SOL
24/11/05	686,9	02:50	24,0	N/D	BOM
18/11/05	686,6	09:30	25,0	N/D	N/D
18/11/05	686,3	N/D	N/D	86,0%	BOM
09/11/05	685,1	04:50	20,0	87,0%	SOL
28/09/05	683,9	N/D	N/D	47,0%	SOL
28/09/05	683,3	N/D	N/D	67,0%	SOL
28/09/05	683,0	02:20	21,0	75,0%	BOM
27/09/05	682,4	N/D	N/D	65,0%	BOM
20/09/05	681,8	N/D	N/D	42,0%	SOL
20/09/05	681,5	N/D	N/D	79,0%	SOL
17/09/05	681,2	N/D	N/D	94,0%	NUBLADO TOTAL
16/09/05	680,9	N/D	N/D	89,0%	NUBLADO TOTAL
05/09/05	678,8	N/D	N/D	48,0%	SOL
29/08/05	678,2	N/D	N/D	53,0%	SOL
29/08/05	677,0	N/D	N/D	48,0%	SOL
29/08/05	677,0	16:30	24,0	59,0%	SOL
25/08/05	676,7	02:10	13,0	68,0%	NUBLADO TOTAL
24/08/05	676,7	20:15	20,5	46,0%	SOL
24/08/05	676,4	17:00	21,0	53,0%	SOL
24/08/05	676,1	N/D	N/D	73,0%	NUBLADO TOTAL
22/08/05	675,5	N/D	N/D	76,0%	BOM
15/08/05	673,4	09:30	14,0	91,0%	SOL
03/09/05	671,0	N/D	N/D	87,0%	BOM
01/08/05	671,0	N/D	N/D	78,0%	SOL
28/07/05	670,4	N/D	N/D	74,0%	SOL
21/07/05	669,5	N/D	N/D	75,0%	NUBLADO PARCIAL
21/07/05	669,2	21:38	16,0	80,0%	BOM
19/07/05	668,6	N/D	N/D	82,0%	BOM
18/07/05	668,0	N/D	N/D	88,0%	SOL
13/07/05	667,7	N/D	N/D	43,0%	SOL
13/07/05	667,7	N/D	N/D	38,0%	SOL

N/D = NÃO DISPONÍVEL