

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

“Estudo de Deslocamentos na Tomada d’Água da UHE Jaguari Devidos à
Reação Álcali-Agregado”

CAMILA SANCOWICH ZOILO

Co-orientador: Prof. Dr. Haroldo de Mayo Bernardes

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Akasaki

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Estruturas

Ilha Solteira – SP
Abril/2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP – Ilha Solteira.

Z85e Zoilo, Camila Sancowich.
Estudo de deslocamentos na tomada d'água da UHE Jaguari devidos
à reação álcali-agregado / Camila Sancowich Zoilo. -- Ilha Solteira :
[s.n.], 2010
178 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2010

Orientador: Jorge Luis Akasaki
Co-orientador: Haroldo de Mayo Bernardes

1. Concreto. 2. Reação álcali-agregado. 3. Barragens - Segurança.
4. Monitoramento. 5. Instrumentação.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo de Deslocamentos na Tomada d'Água da UHE Jaguari Devidos à Reação Álcali-Agregado


AUTORA: CAMILA SANCOWICH ZOILO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. HAROLDO DE MAYO BERNARDES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA CIVIL, Área: ESTRUTURAS, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. HAROLDO DE MAYO BERNARDES
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOSE ANTONIO MATTHIESEN
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. SELMO CHAPIRA KUPERMAN
Departamento de Engenharia de Construção Civil / Escola Politécnica Da Usp

Data da realização: 08 de abril de 2010.

*À minha família e namorado com
amor e carinho.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por proporcionar a oportunidade de viver e de realizar sonhos. Sem Sua vontade nada é possível...

Aos meus pais, Aparecido Doniseti e Clarice, que de maneira muito simples, intensa e com amor incondicional, sempre se esforçaram para proporcionar aos meus irmãos e a mim a melhor educação.

Aos meus irmãos, Gustavo e Cristina, pelo apoio, ajuda e paciência. Especialmente ao Gustavo, com quem pude dividir a vivência em Ilha Solteira por dois anos e que demonstrou toda a sua paciência para me ajudar e fazer aquele macarrão toda semana! É o melhor! Sinto muitas saudades...

À minha querida avó e madrinha D. Emília, modelo de luta, coragem, força, sabedoria, É o exemplo da minha vida. Te amo muito!

Ao Antônio Rogério, meu grande amor, amigo, companheiro, pela paciência infinita, amor, ajuda e apoio. Você é um exemplo de força, competência, otimismo e honestidade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Haroldo de Mayo Bernardes, pelo convite para participar do projeto de P&D (em meados de 2005) como aluna de iniciação científica, isto me rendeu muitos frutos. Apesar da longa espera para a aprovação, tenho certeza que tudo aconteceu na hora certa. Por sua paciência e orientação não só na pesquisa, mas em todos os momentos.

Ao Eng. Flávio Moreira Salles, coordenador do Projeto de P&D, pela oportunidade de participar deste projeto, primeiramente como aluna de iniciação científica, depois como mestranda, o que proporcionou uma convivência no Laboratório CESP de Engenharia Civil ao longo de dois anos com constante e intenso aprendizado. Agradeço pelos seus ensinamentos de engenharia e de vida, pela amizade dedicada e ajuda para o acontecimento do projeto. Seus ensinamentos seguirão comigo.

Ao Prof. Dr. Selmo Chapira Kuperman, consultor do projeto de P&D, pelos ensinamentos, apoio, ajuda e paciência em nos passar parte do seu conhecimento. É um exemplo de profissionalismo e inteligência. Colaborador fundamental para o acontecimento do projeto.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de mestrado.

À CESP, pelo financiamento do projeto de P&D.

À ANEEL pela aprovação do projeto de P&D e repasse do financiamento.

Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), nas pessoas de seus Engenheiros: Wanderley Ognebene, coordenador do LCEC, Flávio Moreira Salles, Aloísio Celeri e

Claudio Miro Maurício da Rocha Filho, pelo incondicional apoio e fornecimento de toda a estrutura, em suas instalações, para o acontecimento do projeto.

Agradeço à equipe técnica do Laboratório CESP de Engenharia Civil, primeiramente da área de instrumentação de barragens, ligada diretamente ao projeto, nas pessoas de Lourival, Valdecir (Jarrão), Jair, Célio, Franquilei, Vicente, Edgar, nesta turma devo incluir o Pascoalim, da área de ensaios estruturais, que tanto ajudou nas instalações. Uma verdadeira equipe, na qual cada um teve uma dedicação fundamental para o sucesso dos trabalhos. Sem vocês nada seria possível. Tenho certeza que conquistei bons e verdadeiros amigos.

Aos colaboradores das demais áreas do LCEC, em especial: José Luiz – informática; Antônio (Toninho), José Vieira, Francisco (Chicão) – motoristas; Ademir (Branco), Jorge, Sérgio, Michelin, Francisco (Chiquinho), Lana, Euclides (Piquira), Gilmar, Joaquim, Marcos, Anderson, Bertolucci (Bertô), Sumie, Rosângela (Rô), Aparecida (Cidinha) - tecnologia de concreto. Excelentes profissionais! Especialmente aos amigos que conquistei...

Às meninas do administrativo, pessoas especiais por quem sinto enorme carinho: Karen, Paula, Jack, Karina.

À D. Neuza, pelos cafezinhos, e aos colaboradores dos serviços gerais.

Aos colegas de projeto: Maria Lidiane e Camilo.

Aos funcionários e colaboradores da CESP, envolvidos com a UHE Jaguari, pelo enorme apoio nas instalações dos equipamentos e nas leituras, pessoas fundamentais para o sucesso do projeto. Não posso deixar de citar cada um de vocês: Eng. Ulisses, Ariovaldo, Carlos, Antônio Fernando, Antônio Luiz (Xuxão), Isaac, Benedito Antônio (Fião), José Francisco (Zé Chico).

À equipe técnica da CESP envolvida com levantamentos topográficos, em especial ao Casagrande e aos técnicos especializados no SICESP, Piqueira e Gilberto.

Aos Professores da UNESP, campus de Ilha Solteira, Prof. Dr. Hermes Adolfo de Aquino, pela ajuda e apoio nos estudos de incerteza das medições e Prof. Dr. Renato Bertolino Junior, pelo auxílio no dimensionamento das vigas utilizadas.

Aos meus queridos amigos. Alessandra, Angélica, Antônio, Bruno, Everton, Maria Lidiane, Marina, Marcos, Miriam, Murilo. Vocês estão no meu coração!

Obrigada!

Camila Sancowich Zoilo

RESUMO

A reação química que ocorre no concreto entre os álcalis oriundos predominantemente do cimento e a sílica amorfa proveniente do agregado gera um produto higroscópico e expansivo que pode causar sérios danos à estrutura. Este processo é conhecido como reação álcali-agregado (RAA). A expansão provocada pelo produto da reação pode levar uma estrutura a apresentar elevados deslocamentos diferenciais e ao surgimento de fissuras com movimentações evolutivas, entre outros tipos de problemas operacionais. A Usina Hidrelétrica (UHE) de Jaguari, pertencente à Companhia Energética de São Paulo (CESP), tem apresentado problemas relacionados à ocorrência de RAA desde a década de 80, aproximadamente dez anos após o término da sua construção, o que torna imprescindível monitorar os deslocamentos, avaliar a intensidade e a duração do fenômeno e verificar a necessidade de intervenções antecipadas para que seu perfeito funcionamento não fique comprometido. Diante disto, fez-se necessário e oportuno investigar o concreto da usina e realizar a implantação de um sistema de monitoramento para acompanhamento do fenômeno expansivo. Este trabalho contempla o relato do desenvolvimento de um projeto para o monitoramento das estruturas da tomada d'água da UHE Jaguari, demonstrando detalhadamente as justificativas e particularidades das técnicas utilizadas e das instalações no local e faz uma análise preliminar dos resultados das medições verificados por um período de tempo relativo ao projeto e suas indicações para a tomada d'água. O sistema de monitoramento implantado contemplou a observação das principais movimentações causadas pela RAA, por meio de equipamentos tradicionais, adaptados para o local e o desenvolvimento de dois aparatos de medição de movimentos relativos entre paredes, com equipamentos de princípio de funcionamento ótico e indutivo.

Palavras-chave: Concreto. Reação Álcali-Agregado. Segurança de Barragens. Monitoramento. Instrumentação.

ABSTRACT

The chemical reaction that occurs in concrete, between predominantly alkalis from the cement and amorphous silica arising from the aggregate generates a hygroscopic, expansive product, which may severely damage the structure. This process is known as Alkali-Aggregate Reaction (AAR). The expansion caused by the product of the reaction may lead a structure to present large differential displacements and cracks with evolution motion, among other types of operational problems. Jaguari Hydroelectric Power Plant owned by Companhia Energética de São Paulo - CESP, has been having problems related to the incidence of AAR since 1980s, approximately ten years after its construction was completed, what turns indispensable to monitor displacements, assess the intensity and duration of a phenomenon and check the need for interventions beforehand so that perfect operation is not committed. Therefore, it has become necessary and timely to investigate the concrete and carry out the implantation of a monitoring system to follow up the expansive phenomenon. This project contemplates the report of development the monitoring project of Jaguari water intake structure, detailing the techniques used for the installation of the instrumentation, besides a preliminary investigation of the measurements results checked by a period of relative time to the project and their indications for water intake structure. The monitoring system implanted has contemplated the observation of the main motions caused by AAR, by means of traditional equipment adjusted to the place and the development of two devices for measuring the relative motion between walls, with equipment based on optical and inductive principle of operation equipment.

Keywords: Concrete. Alkali-Aggregate Reaction. Dams Safety. Monitoring. Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Correlação entre os tipos de anormalidades em barragens de concreto e os instrumentos de observação	31
Figura 2	Posições de leitura do medidor triortogonal	35
Figura 3	Simulação de medidor triortogonal instalado em uma junta de contração.....	35
Figura 4	Conjunto de BT instalado em fissura	36
Figura 5	Base de alongâmetro.....	37
Figura 6	Esquema de instalação do extensômetro de haste em furo de sondagem.....	39
Figura 7	Simulação do esquema de instalação do pêndulo direto	41
Figura 8	Base de leitura.....	41
Figura 9	Coordinômetro	41
Figura 10	Partes componentes do pêndulo invertido	42
Figura 11	Esquematização simplificada da formação do LVDT.....	49
Figura 12	Vista em corte de um LVDT.....	50
Figura 13	UHE Jaguari.....	67
Figura 14	Barragem de terra.....	67
Figura 15	Vertedouro de superfície.....	67
Figura 16	Casa de força.....	67
Figura 17	Tomada d'água em construção. Vista frontal	68
Figura 18	Tomada d'água em 2009.....	68
Figura 19	Vista frontal e cortes.....	69
Figura 20	Vista superior e corte em planta.....	70
Figura 21	Medidores triortogonais instalados na laje da tomada d'água.....	72
Figura 22	Localização e posicionamento dos MT na laje da tomada d'água.....	73
Figura 23	Deslocamentos do medidor triortogonal 1.....	74
Figura 24	Deslocamentos do medidor triortogonal 2.....	74
Figura 25	Deslocamentos do medidor triortogonal 3.....	75
Figura 26	Fissurações na laje.....	78
Figura 27	Fissurações aleatórias nas paredes externas e contrafortes.....	78
Figura 28	Fissurações aleatórias nas paredes internas da câmara do servomotor	78
Figura 29	Fissura orientada com exposição de armadura na laje da tomada d'água	79

Figura 30	Fissuras verticais nos pilares.....	79
Figura 31	Fissurações nas paredes internas do compartimento do stop-log.....	80
Figura 32	Fissurações e descoloração no concreto dos muros guia da grade.....	80
Figura 33	Exsudação de material branco de fissuras	81
Figura 34	Deslocamento diferencial da guia metálica da grade (muro guia esquerdo)	81
Figura 35	Poros do concreto preenchidos com material de reação.....	81
Figura 36	Mapeamento de fissuras na laje	82
Figura 37	Mapeamento de fissuras no pilar.....	82
Figura 38	Marco superficial trapezoidal.....	83
Figura 39	Teodolito WILD T3.....	84
Figura 40	Baliza centrada em MS na laje da tomada d'água	84
Figura 41	Localização em planta da tomada d'água e do marco básico da margem esquerda	85
Figura 42	Marco de referência indeslocável.....	86
Figura 43	Nível WILD N3.....	86
Figura 44	Mira invar graduada	86
Figura 45	Mira centrada no marco de referência	86
Figura 46	Mira centrada no MS da tomada d'água.....	86
Figura 47	Medidores triortogonais instalados na tomada d'água	89
Figura 48	Dispositivo de leituras do medidor triortogonal.....	90
Figura 49	Bases para medição dos movimentos de fissuras instaladas na UHE Jaguari	92
Figura 50	Aparelho de leitura e gabarito de instalação das BT	93
Figura 51	Localização das BT no pórtico de carga.....	93
Figura 52	BT e MT.....	93
Figura 53	Localização de MT e BT na laje, pilares e pórtico de carga. Vista em planta e projeções	94
Figura 54	Localização de MT e BT nas paredes internas da câmara do servomotor. Vista em planta.....	94
Figura 55	Localização de BT nas paredes internas da câmara do servomotor. Projeção das paredes VI e VII	95
Figura 56	Localização de BT nas paredes internas da câmara do servomotor. Projeção das paredes III e V	95
Figura 57	Furo de sondagem	98
Figura 58	Localização dos furos de sondagem. Planta	99

Figura 59	Recipiente e flutuador do pêndulo invertido.....	100
Figura 60	Estrutura de suporte e proteção do pêndulo invertido	100
Figura 61	Perfil de instalação do EH-1	102
Figura 62	Borracha de Polietileno danificada.....	103
Figura 63	Pedrisco para preenchimento dos furos	103
Figura 64	Instalação das hastes do EH-1 – parte 1	103
Figura 65	Instalação das hastes do EH-1 – parte 2	104
Figura 66	Instalação da cabeça de leitura do EH-1	105
Figura 67	Perfil de instalação do EH-2	106
Figura 68	Instalação do EH-2	107
Figura 69	Extensômetros múltiplos de hastes instalados	107
Figura 70	Detalhe aproximado dos muros guia da grade.....	108
Figura 71	Croqui do medidor laser, modelo ILD 1300-50.....	111
Figura 72	Medidor de deslocamentos laser	112
Figura 73	Dimensões dos muros guia da grade. Vista lateral direita – muro guia esquerdo	116
Figura 74	Projeto da viga metálica e aparato de medição – laser	117
Figura 75	Confecção da viga metálica treliçada	118
Figura 76	Simulação da montagem e funcionamento do aparato de sustentação do laser	118
Figura 77	Instalação do aparato de medição com laser.....	120
Figura 78	Aparato de medição instalado e protegido.....	121
Figura 79	Sensor de temperatura e sistema eletrônico integrado	122
Figura 80	Calibração do termômetro	122
Figura 81	Posicionamento e denominação dos termômetros do aparato de medição com Laser	123
Figura 82	Croqui do LVDT, modelo LVP-50	125
Figura 83	Sensor indutivo LVDT	125
Figura 84	LVDT com adaptações	125
Figura 85	Projeto da viga metálica e aparato de medição - LVDT.....	128
Figura 86	Detalhe do rolete do aparato de medição com LVDT e barra de invar sobreposta	129
Figura 87	Localização dos aparatos de medição e sistema de aquisição de dados.....	130
Figura 88	Instalação do aparato de medição com LVDT.....	130

Figura 89	Posicionamento e denominação dos termômetros do aparato de medição com LVDT.....	131
Figura 90	Termômetro instalado na barra de invar	131
Figura 91	Componentes do sistema de aquisição de dados.....	133
Figura 92	Leituras retiradas do sistema de aquisição de dados, abertas em Excel.....	133
Figura 93	Testes nos equipamentos	134
Figura 94	Sistema de aquisição de dados em campo	134
Figura 95	Deslocamentos medidos pelo MT-8.....	135
Figura 96	Deslocamentos medidos pelo MT-9.....	135
Figura 97	Deslocamentos medidos pelo MT-10.....	136
Figura 98	Deslocamentos medidos pelo MT-11	136
Figura 99	Deslocamentos medidos pelo MT-12.....	136
Figura 100	Deslocamentos medidos pelo MT-13.....	137
Figura 101	Deslocamentos medidos pelo MT-14.....	137
Figura 102	Deslocamentos medidos pelas BT-1, BT-2, BT-3, BT-4 e BT-5.....	138
Figura 103	Deslocamentos medidos pelas BT-6, BT-7, BT-8, BT-9 e BT-10.....	138
Figura 104	Deslocamentos medidos pelas BT-11, BT-12, BT-13, BT-14 e BT-15.....	138
Figura 105	Deslocamentos medidos pelas BT-16, BT-17, BT-18, BT-19 e BT-20.....	139
Figura 106	Deslocamentos medidos pelas BT-21, BT-22, BT-23 e BT-24.....	139
Figura 107	Deslocamentos das regiões representadas pelas hastes – EH – 1	140
Figura 108	Deslocamentos das regiões entre as cotas de chumbamento das hastes – EH –	141
Figura 109	Deslocamentos das regiões representadas pelas hastes – EH – 2	141
Figura 110	Deslocamento da região entre as cotas de chumbamento das hastes – EH - 2 .	141
Figura 111	Deslocamentos do MS-323	142
Figura 112	Deslocamentos do MS-324.....	143
Figura 113	Deslocamentos do MS-325	143
Figura 114	Deslocamentos do MS-326.....	143
Figura 115	Movimento medido pelo Laser – 6h00.....	144
Figura 116	Correlação entre a temperatura e o período de observação – aparato com Laser - 6h00	145
Figura 117	Correlação entre temperatura e movimento – aparato com Laser – 6h00	145
Figura 118	Movimento medido pelo Laser – 15h00.....	145

Figura 119	Correlação entre a temperatura e o período de observação – aparato com Laser - 15h00	146
Figura 120	Correlação entre temperatura e movimento – aparato com Laser – 15h00	146
Figura 121	Movimento medido pelo LVDT – 6h00	147
Figura 122	Correlação entre a temperatura e o período de observação – aparato com LVDT - 6h00	147
Figura 123	Correlação entre temperatura e movimento – aparato com LVDT – 6h00	147
Figura 124	Movimento medido pelo LVDT – 15h00	148
Figura 125	Correlação entre a temperatura e o período de observação – aparato com LVDT - 15h00	148
Figura 126	Correlação entre temperatura e movimento – aparato com LVDT – 15h00	148

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Ficha técnica da UHE Jaguari.....	71
Quadro 2	Movimento medido pelos medidores triortogonais em cada eixo de referência. 73	
Quadro 3	Principais características do medidor de deslocamentos laser.....	111
Quadro 4	Principais características do LVDT.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Taxas de deslocamentos das fissuras nas três direções ortogonais medidas pelos MT	74
Tabela 2	MT instalados na tomada d'água da UHE Jaguari	88
Tabela 3	BT instaladas na tomada d'água da UHE Jaguari	91
Tabela 4	Características das hastes e do furo de sondagem – EH-1	102
Tabela 5	Características das hastes e do furo de sondagem – EH-2.....	106
Tabela 6	Leituras e deslocamentos – EH-1	168
Tabela 7	Leituras e deslocamentos – EH-2.....	169
Tabela 8	Leituras e deslocamentos 6h00 – aparato de medição com laser	170
Tabela 9	Leituras e deslocamentos 15h00 – aparato de medição com laser.....	172
Tabela 10	Leituras e deslocamentos 6h00 – aparato de medição com LVDT	174
Tabela 11	Leituras e deslocamentos 15h00 – aparato de medição com LVDT	176

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	Alkali-Aggregate Reaction
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Base para Medição dos Movimentos de Fissuras
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CLP	Controlador Lógico Programável
EH	Extensômetro Múltiplo de Hastes
GPS	Global Positioning System
ICOLD	International Committee on Large Dams
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LCEC	Laboratório CESP de Engenharia Civil
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MB	Marco Básico
MS	Marco Superficial
MT	Medidor Triortogonal
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
RAA	Reação Álcali-Agregado
RAS	Reação Álcali-Sílica
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo S.A.
SAP	Structural Analysis Program
SICESP	Sistema CESP de Segurança de Barragens
UHE	Usina Hidrelétrica
UNESP	Universidade Estadual Paulista

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA.....	18
1.2	OBJETIVO	21
1.3	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA	21
2	A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E SUAS CONSEQUÊNCIAS - CONCEITOS.....	23
3	SEGURANÇA ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE CONCRETO: OBSERVAÇÃO QUANTO À OCORRÊNCIA DE RAA, MONITORAMENTO E DISPOSIÇÕES CORRETIVAS.....	28
3.1	ASPECTOS GERAIS.....	29
3.2	MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE CONCRETO COM REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....	31
3.2.1	Instrumentação.....	31
3.2.1.1	<i>Deslocamentos diferenciais entre blocos e fissuras.....</i>	<i>33</i>
3.2.1.2	<i>Deslocamentos verticais relativos.....</i>	<i>37</i>
3.2.1.3	<i>Deslocamentos horizontais relativos.....</i>	<i>39</i>
3.2.1.4	<i>Deformações</i>	<i>42</i>
3.2.1.5	<i>Deslocamentos angulares.....</i>	<i>43</i>
3.2.1.6	<i>Subpressões.....</i>	<i>43</i>
3.2.1.7	<i>Vazões de drenagem.....</i>	<i>44</i>
3.2.2	Medições por técnicas geodésicas.....	44
3.2.2.1	<i>Triangulação e trilateração geodésicas.....</i>	<i>45</i>
3.2.2.2	<i>Nivelamento geométrico.....</i>	<i>45</i>
3.2.2.3	<i>Poligonação.....</i>	<i>46</i>
3.2.2.4	<i>Determinação de coordenadas por GPS.....</i>	<i>46</i>
3.2.3	Outros equipamentos medidores de deslocamento	47
3.2.3.1	<i>Laser.....</i>	<i>47</i>
3.2.3.2	<i>Linear Variable Differential Transformer (LVDT).....</i>	<i>49</i>
3.2.4	Inspeção e análise visual.....	51
3.2.5	Modelagem matemática	52

3.3	PANORAMA DE CASOS.....	53
3.3.1	Casos internacionais.....	54
3.3.1.1	<i>E.U.A.</i>	54
3.3.1.2	<i>Canadá</i>	56
3.3.1.3	<i>Portugal</i>	58
3.3.1.4	<i>Continente Africano</i>	59
3.3.1.5	<i>França</i>	59
3.3.1.6	<i>Espanha</i>	60
3.3.2	Casos brasileiros.....	61
4	ESTUDO DE CASO: UHE JAGUARI - CESP.....	65
4.1	HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS.....	65
4.2	MONITORAMENTO NA TOMADA D'ÁGUA – 1ª ETAPA.....	72
4.3	SISTEMA CESP DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (SICESP).....	75
5	MONITORAMENTO NA TOMADA D'ÁGUA DA UHE JAGUARI – 2ª ETAPA.....	76
5.1	INSPEÇÕES VISUAIS.....	77
5.2	TÉCNICAS GEODÉSICAS DE MONITORAMENTO.....	83
5.2.1	Monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais absolutos.....	83
5.2.1.1	<i>Concepção</i>	83
5.2.1.2	<i>Método das colimações</i>	84
5.2.1.3	<i>Nivelamento geométrico de precisão</i>	85
5.3	INSTRUMENTAÇÃO.....	87
5.3.1	Monitoramento das movimentações das fissuras.....	87
5.3.1.1	<i>Concepção</i>	87
5.3.1.2	<i>Medidores Triortogonais (MT)</i>	88
5.3.1.3	<i>Bases para Medição dos Movimentos de Fissuras (BT)</i>	90
5.3.2	Monitoramento dos deslocamentos horizontais e verticais relativos.....	96
5.3.2.1	<i>Concepção</i>	96
5.3.2.2	<i>Furos de Sondagem</i>	97
5.3.2.3	<i>Pêndulo Invertido</i>	99
5.3.2.4	<i>Extensômetro de Haste nº 1 (EH-1)</i>	101
5.3.2.5	<i>Extensômetro de Haste nº 2 (EH-2)</i>	105
5.3.3	Monitoramento dos deslocamentos relativos entre os muros guia da grade....	108

5.3.3.1	<i>Concepção</i>	108
5.3.3.2	<i>Características do medidor de deslocamentos a laser</i>	110
5.3.3.3	<i>Particularidades do aparato de medição</i>	112
5.3.3.4	<i>Detalhamento do aparato de medição</i>	115
5.3.3.5	<i>Instalação do aparato de medição</i>	119
5.3.3.6	<i>Medição da temperatura na barra de invar</i>	121
5.3.4	Monitoramento dos deslocamentos relativos entre as paredes do compartimento de armazenamento do stop-log	123
5.3.4.1	<i>Concepção</i>	123
5.3.4.2	<i>Características do LVDT</i>	123
5.3.4.3	<i>Particularidades do aparato de medição</i>	126
5.3.4.4	<i>Detalhamento do aparato de medição</i>	126
5.3.4.5	<i>Instalação do aparato de medição</i>	129
5.3.4.6	<i>Medição da temperatura na barra de invar</i>	131
5.3.5	Sistema de aquisição de dados	131
5.4	PRIMEIRAS LEITURAS	135
5.4.1	Medidores triortogonais	135
5.4.2	Bases para medição dos movimentos de fissuras	137
5.4.3	Extensômetros de Hastes	139
5.4.4	Técnicas geodésicas de monitoramento	142
5.4.5	Aparato de medição com Laser	144
5.4.6	Aparato de medição com LVDT	146
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	149
7	CONCLUSÕES	153
	REFERÊNCIAS	156
	APÊNDICE A – DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR E INCERTEZAS	166
	APÊNDICE B – PLANILHAS DE LEITURAS	168

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

A reação álcali-agregado é uma patologia de origem química que pode causar danos irreversíveis em concretos devido à sua natureza expansiva. Várias estruturas de concreto expostas à umidade, entre elas, barragens, estão apresentando problemas estruturais e operacionais como: fissurações, distorções e desalinhamentos de comportas e turbinas, perda de estanqueidade do concreto, entre outros, cuja gravidade pode levar à desativação da estrutura.

Para Hasparyk (2005) os problemas causados pela RAA passam a ter maior dimensão em estruturas em que se encontram instalados equipamentos hidrodinâmicos e elétricos e os custos decorrentes da manutenção e reparo são bastante elevados.

De acordo com Fournier et al. (2005), a demolição/reconstrução de grandes estruturas de concreto afetadas pela reação álcali-sílica – RAS (um tipo de reação álcali-agregado) raramente acontece. No entanto, há alguns relatos de estruturas e de partes das estruturas que são substituídas por razões de funcionalidade e segurança.

Hobbs (1988) conta que nos anos 60 duas pontes foram demolidas na Alemanha em consequência do nível de deterioração apresentado. Federal Energy Regulatory Commission (1999) relata que foram realizados reforços nas estruturas das barragens Stewart Mountain (EUA), Churchil (África do Sul) e Gmued (Áustria). Em Matilija (EUA), os doze metros superiores foram substituídos, devido à elevada deterioração do concreto e em Drum Afterbay (EUA) as taxas de expansão foram tão elevadas que a barragem foi substituída por uma nova estrutura em arco à jusante. American Falls (EUA) também foi reconstruída após 52 anos de idade (RELATÓRIO FINAL, 1999) e Mactaquac (Canadá) tem projeção para ser reconstruída até 2030 (THOMAS et al., 2008).

As informações do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* indicam que oito estruturas de concreto afetadas pela RAS foram demolidas e reconstruídas na França, por razões políticas, econômicas e técnicas. De um rigoroso ponto de vista técnico, as estruturas

poderiam ter sido preservadas em serviço com um apropriado programa de monitoramento para assegurar a segurança pública (LCPC, 2003 apud FOURNIER et al., 2005).

Isto evidencia a gravidade do problema e a atenção que deve ser despendida pelo meio técnico para o entendimento da reação e gerenciamento de esforços organizados para minimizar os seus efeitos, seja em estruturas que serão construídas ou naquelas já existentes.

Há, no meio técnico, dúvidas a respeito do real mecanismo deletério da RAA, por quanto tempo perdurará a sua expansibilidade, providências de manutenções e ensaios que representem com confiabilidade a potencialidade reativa dos materiais. Para a investigação, o entendimento e a atuação de atividades coordenadas no combate a esta patologia é necessário que as experiências em outras obras sejam descritas, bem como as medidas providenciais que foram tomadas.

Desde a década de 80 são relatadas observações de anomalias nas estruturas de concreto da UHE Jaguari, pertencente à CESP. Em 2000, estudos aprofundados no concreto da usina indicaram a RAA como a causa principal das deteriorações.

A estrutura da tomada d'água causa maior preocupação. A intensificação da RAA neste local poderá afetar a segurança estrutural e resultar, principalmente, no desalinhamento da guia da grade e das comportas-ensecadeira, prejudicando a movimentação destas peças. Isto poderá acarretar problemas ao funcionamento da usina, comprometendo a receita anual da CESP de cerca de R\$ 7.358.000,00/ano, relativo a esta usina, conforme dados informados pela empresa, bem como prejudicar o abastecimento de água do Vale do Paraíba e de cidades do Estado do Rio de Janeiro, pois há uma descarga mínima obrigatória à jusante, imprescindível para o saneamento básico da região.

Diante do problema diagnosticado e da identificação das necessidades e carências do meio técnico no assunto RAA, foi elaborado um programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P & D) pelo Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC) em parceria com a UNESP, campus de Ilha Solteira, com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e com a Desek, empresa de consultoria, no sentido de investigar intensamente o fenômeno e seus efeitos nas propriedades mecânicas do concreto e na segurança estrutural da tomada d'água da UHE Jaguari. O projeto de P & D possuía quatro vertentes fundamentais de investigação da RAA, que foram:

- Investigar a RAA da UHE Jaguari por meio de ensaios laboratoriais e desenvolver um método e equipamento de ensaio acelerado para concretos;
- Desenvolver método de ensaio não destrutivo, baseado no Método da Mancha, com reagentes brasileiros;
- Identificar as porcentagens mínimas de produtos inibidores da RAA a serem adicionadas aos concretos e sua duração e
- Determinar e instalar instrumentação de auscultação para observação das taxas de expansão do concreto na tomada d'água da usina.

Este trabalho contempla a elaboração de um projeto de monitoramento estrutural da tomada d'água da UHE Jaguari para a observação do seu comportamento frente à expansibilidade desenvolvida pelo concreto, consequência da RAA. Uma vez comprovada a existência de efeitos deletérios oriundos da reação, uma das ações emergenciais é a verificação cuidadosa dos resultados do monitoramento já realizado e a ampliação deste sistema. Na tomada d'água da UHE Jaguari havia poucos pontos de observação dos deslocamentos em fissuras, por instrumentação, o que demonstrou a necessidade da implantação de um sistema de monitoramento mais amplo.

As técnicas de monitoramento determinadas para tal aplicação foram métodos geodésicos e instrumentações, envolvendo a instalação e acompanhamento de leituras de instrumentos convencionais e não convencionais para aplicações específicas. A análise das medidas fornecidas pelas técnicas utilizadas na tomada d'água da UHE Jaguari possibilitará verificar as movimentações de elevação e no plano horizontal do conjunto estrutural, as movimentações e ampliações de fissuras, a taxa de expansão vertical que o concreto está desenvolvendo e a movimentação dos muros e paredes que dão suporte às guias da grade e da comporta-ensecadeira. Este monitoramento é imprescindível para avaliar o comportamento estrutural do empreendimento e garantir que eventuais intervenções antecipadas sejam realizadas. Em longo prazo será possível aferir um modelo matemático com os valores das taxas de expansão do concreto, de modo a estimar a continuidade do fenômeno e a extensão dos danos.

Apesar da RAA não causar, ainda, problemas relacionados à segurança e à operação da UHE Jaguari, é imperativo investigar a duração e a intensidade do fenômeno patológico.

1.2 OBJETIVO

A finalidade deste trabalho é estudar os procedimentos necessários para a observação do comportamento estrutural de barragens em que ocorre a reação álcali-agregado e aplicá-los no projeto e instalação de um sistema de monitoramento que possibilite avaliar a tomada d'água da UHE Jaguari frente aos efeitos expansivos que o concreto apresenta.

Objetivos específicos:

- Estabelecer os deslocamentos mais relevantes, que devem ser observados numa estrutura com comportamento expansivo;
- Elaborar plano de instalação de equipamentos medidores de deslocamentos horizontais, verticais e de abertura de fissuras nos locais considerados mais relevantes da estrutura;
- Desenvolver um aparato de medição dos deslocamentos relativos entre os muros guia da grade com equipamento ótico;
- Desenvolver um aparato de medição dos deslocamentos relativos entre as paredes do compartimento de armazenamento da comporta ensecadeira (*stop log*) com equipamento indutivo;
- Registrar os aspectos mais importantes na instalação do sistema de monitoramento desenvolvido e
- Avaliar as primeiras leituras do sistema instalado.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

A dissertação foi elaborada em oito capítulos.

O primeiro capítulo é introdutório e composto da justificativa e importância do desenvolvimento da pesquisa, dos objetivos a serem alcançados e fornece uma visão panorâmica do trabalho.

Como forma de particularizar o entendimento da RAA, o segundo capítulo apresenta alguns conceitos de reação álcali-agregado de forma concisa, englobando o princípio da reação, os seus principais efeitos em barragens de concreto e fornece indicações de bibliografias que expressam detalhadamente os mecanismos da reação.

Em consequência das manifestações do fenômeno é imperativo monitorar as estruturas afetadas, sendo esta a principal linha de objetivos deste trabalho. Desta forma, o terceiro capítulo fornece uma perspectiva geral do sistema de monitoramento e dos efeitos da RAA em barragens e, especificamente, traz um resumo das principais investigações realizadas nas estruturas afetadas pela RAA, no sentido de relacionar as informações obtidas na revisão bibliográfica com as técnicas de monitoramento efetivamente utilizadas na UHE Jaguari. Este capítulo ainda traz um panorama mundial de casos de barragens com a patologia.

No quarto capítulo está o estudo de caso, que fornece as características da UHE Jaguari, um histórico das observações de anomalias nas estruturas da usina e as atividades relacionadas ao monitoramento, realizadas antecipadamente ao acontecimento do projeto de P&D.

O quinto capítulo é o resultado dos objetivos relacionados neste trabalho. Neste se encontram as inspeções visuais realizadas na tomada d'água da UHE Jaguari durante o desenvolvimento do projeto e as técnicas de monitoramento de deslocamentos utilizadas para a auscultação das estruturas, envolvendo as justificativas, particularidades das técnicas e características e propriedades de instalação. Este capítulo ainda mostra os gráficos de deslocamentos referentes às primeiras leituras do monitoramento instalado.

O sexto capítulo traz um relato sobre a análise dos resultados obtidos, referente às técnicas utilizadas, instalações e primeiras leituras.

O sétimo capítulo conclui a dissertação e relata sugestões para trabalhos futuros.

A seguir estão as referências bibliográficas.

O apêndice A mostra os cálculos realizados para a dilatação térmica e para as incertezas, associadas nas medidas com os aparatos de medição dos deslocamentos.

O apêndice B traz as planilhas de leituras dos equipamentos eletrônicos e do extensômetro de hastes.

2 A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E SUAS CONSEQUÊNCIAS - CONCEITOS

Os estudos sobre RAA são recentes. No final da década de 30, Thomas E. Stanton observou que barras de argamassas localizadas em um recipiente estavam cobertas com manchas brancas, eflorescências, que posteriormente verificou-se serem de carbonato de sódio e que as mesmas barras apresentavam fissuras similares às existentes em estruturas localizadas na Califórnia. Em 1940, Stanton publicou a primeira descrição da reação que causara aquele tipo de dano (HOBBS, 1988). A partir de então os relatos de ocorrência da reação foram mundiais. No Brasil, o assunto tomou notoriedade na década de 60, após a observação de fissuras no piso da obra da usina hidrelétrica de Jupia, construída pela CESP, uma das maiores obras construídas no país, no período.

A RAA é uma reação química que ocorre em concretos envolvendo os hidróxidos alcalinos presentes, predominantemente, no cimento ¹ e alguns minerais reativos dos agregados utilizados na mistura, cujo resultado é a formação de produtos com características higroscópicas e expansivas, localizados na massa de concreto. Este produto é popularmente chamado de gel da reação.

De acordo com Bernardes (2000), o gel produzido pela reação química é o responsável pela expansão do concreto, pois absorve água e aumenta de volume que, ao superar o volume de vazios do concreto, causa pressões intersticiais que induzem a tensões de tração quando em contato com as paredes dos poros. Por conseguinte, ocorrem micro fraturas nos agregados e ao redor da pasta de cimento, levando à deterioração do concreto.

¹ Segundo Veiga, Gonçalves e Andrade (1997), os hidróxidos alcalinos são derivados de Sódio e Potássio (álcalis) presentes no cimento, porém uma parcela pode advir de fontes externas e/ou ser liberada lentamente dos próprios agregados. Os estudos de Bérubé et al. (2002) demonstraram que grande quantidade de álcalis foram fornecidos pelos agregados, especialmente aqueles que são ricos em feldspatos. Lu et al. (2006) considera que em projetos de estruturas de concreto propensas à ocorrência de RAA, a contribuição de álcalis advindos de agregados reativos deve ser considerada.

O processo químico da RAA pode ser classificado de três formas, em função do tipo e mineralogia do agregado reativo envolvido, como reação álcali-sílica, reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato ². De acordo com Bernardes (2000), os dois primeiros tipos de reação contêm sílica em sua composição (agregados com minerais de sílica) e o último é de natureza carbonática (derivado de certos tipos de calcários).

Segundo Fournier et al. (2005) a reação álcali-sílica é o tipo de RAA mais conhecido mundialmente. Já no Brasil, o tipo mais comum é a reação álcali-silicato (SILVA, 2007), que possui o mesmo princípio da RAS e, por possuir os minerais disseminados na matriz, se desenvolve mais lentamente (REGOURD, 1988 apud HASPARYK, 2005). Por isso, a reação álcali-silicato é considerada um tipo de reação álcali-sílica (SILVA, 2007).

Para a ocorrência das RAA é necessário o acontecimento simultâneo de três fatores essenciais: agregado reativo, cimento com conteúdo suficiente de álcalis (K_2O , Na_2O) e disponibilidade de umidade. A velocidade e a magnitude das expansões dependem da temperatura, da área da superfície específica do material, das tensões confinantes e da contribuição de álcalis externos (PRISZKULNIK, 2005). Além destes, Andriolo (1997a) inclui o teor de material ótimo que possa reagir e a umidade, sendo que a expansão tem relação direta com estes fatores.

Para Swamy (1997) uma vez desenvolvida a RAA em uma estrutura, a fonte de mineral reativo e a quantidade de álcalis disponíveis no concreto não podem ser mudadas ou controladas. Portanto, o fator crítico para o desenvolvimento da reação e, por conseguinte, da deterioração relacionada é a disponibilidade de umidade, de qualquer fonte.

De acordo com Fournier e Bérubé (2000) as principais manifestações da RAA, que podem ser consideradas como sintomas característicos da reação são: deformações e deslocamentos, fissurações ^{3,4}, descoloração das superfícies do concreto e exsudação de gel. Do ponto de vista

² Descrições detalhadas do mecanismo de ocorrência das reações podem ser encontradas em Bernardes (2000); Fournier e Bérubé (2000); Hasparyk (2005); Hobbs (1988); Priszkulnik (2005) e Silva (2007).

³ Em concretos sem armadura as fissurações causadas pela RAA seguem a orientação tipo “mapa”, já em concretos armados, as fissuras acontecem paralelas à armadura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

⁴ Segundo Blanks e Kennedy (1955), as observações das características de fissuração e expansão no concreto são sugestivas da ocorrência de RAA, mas a afirmação da sua existência requer detalhadas examinações por métodos microscópicos. Investigações detalhadas em campo e ensaios laboratoriais em testemunhos extraídos da estrutura afetada são necessárias para confirmar a RAA como causa das deteriorações (FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000).

microestrutural, a expansão pode causar micro fissuras e descolamento do agregado (ANDRIOLO, 1997a). Adicionalmente, é possível observar poros do concreto preenchidos com material da reação.

As conseqüências das manifestações da RAA acarretam, basicamente, mudanças das propriedades mecânicas do concreto e nas condições de funcionalidade de várias estruturas que podem ser afetadas pela patologia, como pontes, edificações, barragens, pavimentos, entre outros, desde que haja todas as condições propícias para o desenvolvimento da reação. Esta revisão bibliográfica entra no âmbito de barragens, pois é a estrutura de estudo do trabalho.

De acordo com Clark (1991 apud RODRIGUES, 2002), a deterioração das propriedades mecânicas incide na diminuição da resistência à compressão e à tração e do módulo de deformação longitudinal do concreto. Giaccio et al. (2008) ressalta que a resistência à compressão não é um bom parâmetro para avaliar a qualidade de um concreto degradado pela reação álcali-sílica, uma vez que as reduções na resistência à compressão são sempre inferiores às demais propriedades analisadas, sendo que em alguns casos pode nem ser afetada.

Para Bernardes (2000), a deterioração das características mecânicas do concreto, como a resistência, pode trazer riscos à segurança estrutural, tanto no panorama de utilização quanto de ruptura.

No âmbito do comportamento estrutural e da funcionalidade, as conseqüências das manifestações do fenômeno nas estruturas de hidrelétricas são (ANDRIOLO, 1997a):

- Desalinhamento de guias e, conseqüentemente, o travamento de comportas de tomada d'água e vertedouro;
- Desalinhamento dos trilhos de pórticos e ponte rolante;
- Comprometimento das vedações das comportas;
- Desalinhamento de turbinas, eixos e geradores;
- Alteração do regime de ações e reações de cargas;
- Alteração do sistema de impermeabilização e drenagem;
- Alteração dos coeficientes de segurança das estruturas;
- Redução da durabilidade;

- Aumento da periodicidade de manutenção e
- Redução da energia gerada.

Para Hasparyk (1999) os principais danos observados em barragens contemplam a abertura de juntas, movimentações diferenciais, perda de estanqueidade, problemas operacionais, entre outros. De acordo com Bernardes (2000) a natureza expansiva da RAA pode dar origem a fissurações com exsudação de gel, dificuldades na operação de comportas e equipamentos eletromecânicos, fechamento de juntas entre blocos e outros problemas relacionados à funcionalidade da estrutura.

O gerenciamento da reação segue diferentes vertentes para concretos de estruturas novas e concretos com evidências da patologia, sendo que nas estruturas novas é possível prevenir o aparecimento dos efeitos deletérios da reação. Isto envolve uma série de ensaios em agregados, cimento e concreto, para verificar se há potencialidade para a ocorrência da reação. Segundo Silva (2007), é adequado partir do pressuposto de que todos os agregados são reativos e, mesmo que uma série de ensaios demonstre a não reatividade do material, é prudente utilizar materiais que previnam o aparecimento da reação. Estes materiais são adições que substituem parte do cimento na dosagem do concreto e podem ser: sílica ativa, pozolana, escória de alto forno, etc.

Uma vez iniciada a reação deve-se proceder ao diagnóstico e posterior plano de ações remediais. Para isto, a principal rotina a ser seguida é (ANDRIOLO, 1997b):

- Inspeções visuais nas estruturas;
- Histórico e levantamento dos dados dos materiais utilizados para a confecção dos concretos e suas dosagens;
- Interpretação inicial dos dados;
- Análise da instrumentação de auscultação existente;
- Análise petrográfica e exposição a ensaios acelerados em testemunhos de concretos extraídos da estrutura em análise para possível verificação da longevidade e intensidade da RAA;
- Eventual adoção de modelagem matemática para a previsão da continuidade e extensão dos danos do fenômeno patológico e
- Implantação de sistema de auscultação complementar para avaliar a amplitude e velocidade das expansões.

Os tratamentos em estruturas afetadas para estancar o processo expansivo exigem técnicas especiais que são, muitas vezes, onerosas e temporárias. Isto ressalta a importância da observação estrutural por técnicas de monitoramento *in loco* para a indicação da necessidade de intervenção de obras e/ou técnicas de reparo e a verificação da longevidade daquelas já existentes, de modo a garantir o funcionamento do empreendimento.

3 SEGURANÇA ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE CONCRETO: OBSERVAÇÃO QUANTO À OCORRÊNCIA DE RAA, MONITORAMENTO E DISPOSIÇÕES CORRETIVAS

Em uma reportagem à Folha de São Paulo em 10/06/2009, após a ruptura da barragem de Algodões, no Piauí (ocorrência em 27/05/2009), Sayão (2009) ressaltou a importância da gestão da segurança das barragens brasileiras. O autor cita que nos últimos oito anos ocorreram cerca de 800 acidentes ou incidentes com estas estruturas, ou seja, em média a cada quatro dias uma barragem apresenta graves problemas no Brasil. Em palavras do autor:

Existem hoje no Brasil centenas de barragens sem dono, sem um responsável privado ou governamental. Centenas de barragens abandonadas, sem vistorias, sem avaliação, sem monitoramento, sem manutenção [...] (SAYÃO, 2009).

A criação de um órgão específico tal como uma comissão federal sobre segurança de barragens, é de extrema importância para definir responsabilidades e implantar procedimentos padronizados. É assim nos principais países desenvolvidos (SAYÃO, 2009).

Para Menescal (2009) – que discute como a questão da segurança das barragens é tratada no Brasil e propõe um modelo de organização institucional para tratar da gestão da segurança de barragens brasileiras – a responsabilidade pela segurança da barragem é do proprietário, sendo que o governo deve ter a responsabilidade de supervisionar. Esta combinação deve completar os requisitos para um nível satisfatório de segurança das barragens no Brasil.

A Comissão de Serviços de Infraestrutura (CI) aprovou, terminativamente, em 04/03/2010 o projeto PLC 168/09, de autoria do deputado Leonardo Monteiro, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Este projeto trata das barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais (ICASSATTI, 2010).

Em virtude da seriedade do assunto, este capítulo traz uma visão dos principais tipos de técnicas utilizadas no monitoramento estrutural de barragens, de forma geral. Especificamente, traz as principais observações estruturais e os respectivos instrumentos mais utilizados em barragens com reação álcali-agregado. Ainda, fornece um panorama mundial de casos a respeito do assunto.

A reação álcali-agregado é uma patologia de concretos que tem afetado muitas barragens no mundo em função das suas condições de exposição. Dependendo do nível de deterioração apresentado pelo concreto, pode trazer prejuízos incalculáveis para o proprietário da estrutura e para usuários do empreendimento. No caso de usinas hidrelétricas e barragens, a geração de energia elétrica e o abastecimento de água podem ser prejudicados, caso uma eventual interrupção venha a ser necessária para reparos. Diante disso, a prevenção, o diagnóstico e o gerenciamento da RAA em barragens deve ser uma particularidade do assunto segurança de barragens.

3.1 ASPECTOS GERAIS

A segurança de um empreendimento está relacionada aos seus aspectos de projeto, construção, instrumentação e manutenção durante a operação e mesmo após o abandono. Para Menescal (2009) a segurança é um conceito artificial e complexo que surge devido às mudanças de percepção e aos avanços técnico-científicos. Ainda segundo o autor, a primeira motivação para procurar uma avaliação da segurança é o medo do perigo, que surge da observação de acidentes e incidentes ao redor do mundo e a busca por se sentir protegido.

A segurança das barragens compreende a segurança estrutural, hidráulico-operacional e a proteção das populações e bens a jusante. Os programas de monitoramento não aumentam intrinsecamente a segurança das barragens, mas tornam-se importantes aliados na verificação da integridade de uma estrutura de concreto, das suposições de projeto e contribuem para o acréscimo de conhecimentos acerca do comportamento estrutural dos empreendimentos. A observação do comportamento histórico da barragem fornece a melhor indicação do seu desempenho futuro (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION, 1999).

Um programa de monitoramento envolve uma série de etapas incluindo as inspeções visuais no local ou remota, medições topográficas e instrumentação.

De acordo com U. S. Army Corps of Engineers (1994) um programa de monitoramento da segurança das barragens por meio da instrumentação deve ser planejado durante a concepção do projeto. Para obter melhor resposta do comportamento da fundação nos períodos de construção e operação do empreendimento, a instrumentação deve ser instalada antes ou durante a construção. A instalação antecipada raramente aumenta os custos do programa de

instrumentação, mas requer planejamento antecipado (U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1994).

Em barragens de concreto os principais parâmetros a serem monitorados, compreendem (HOYO; GUTIERREZ, 1994):

- Drenagem;
- Rotação;
- Temperatura do concreto;
- Deslocamentos horizontais;
- Movimentos de juntas;
- Deformações no concreto e rocha;
- Movimentos unidirecionais;
- Inclinações;
- Parâmetros ambientais (chuva, temperatura, sismos, etc.) e
- Parâmetros do reservatório (elevação e fluxo).

Os deslocamentos, dentre todas as medições usualmente efetuadas em barragens de concreto, dão as indicações mais seguras sobre o comportamento global da estrutura (MENDES, 1962).

Silveira (2003) compilou os potenciais danos que devem ser previstos nas construções de barragens e os respectivos instrumentos e técnicas de monitoramento utilizadas para tal. Esta correlação pode ser visualizada na Figura 1.

De acordo com Granemann (2005) para que se possa considerar uma barragem bem instrumentada, a elaboração de um plano de instrumentação e a seleção de instrumentos deve ser realizada por um profissional qualificado e com conhecimentos aprofundados nesta área. A confecção e a calibração dos instrumentos devem ser supervisionadas, tomando-se especial atenção quanto a sua instalação e manutenção e a aquisição e o processamento dos dados devem ser realizados por equipe treinada.

Para Menescal (2009), a análise da instrumentação exige profissionais experientes e com conhecimento sobre o objetivo geral do projeto de instrumentação de determinada barragem, o comportamento esperado para as estruturas analisadas e as tolerâncias e limitações de cada tipo de instrumento.

Segundo Boletim nº 59, “Dam Safety Recommendations”, publicado por ICOLD (apud HOYO; GUTIERREZ, 1994), a maioria das barragens deterioradas não tem monitoramento ou sistema de aviso, ou os sistemas de medição foram degradados por falta de manutenção adequada. Conseqüentemente, as deteriorações não observadas se agravam, podendo chegar a um desastre. Por isso, a inspeção e monitoramento de barragens, bem como a interpretação e análise rápida dos dados, podem desempenhar um papel crítico e fundamental no campo da segurança das barragens, pois a detecção de um problema rapidamente facilita a redução dos custos na intervenção.

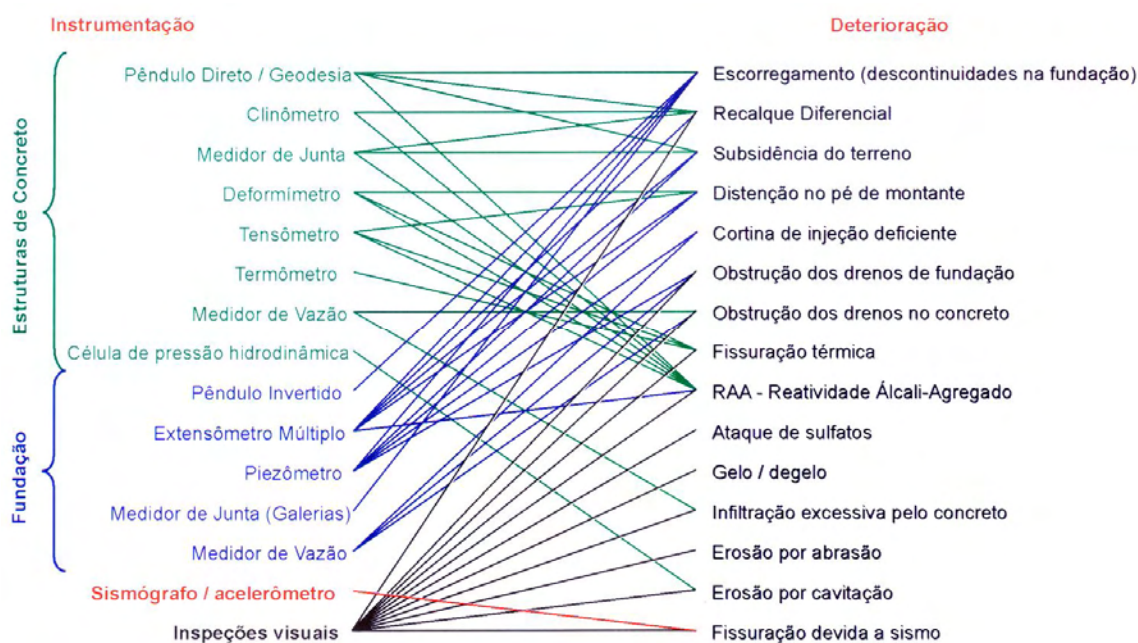


Figura 1: Correlação entre os tipos de anormalidades em barragens de concreto e os instrumentos de observação
Fonte: Silveira (2003)

3.2 MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE CONCRETO COM REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

3.2.1 Instrumentação

Segundo Silveira (1997), ao se deparar com uma barragem afetada pela RAA, ou seja, onde o concreto está se deformando com altas taxas anuais de expansão, a melhor técnica para acompanhamento destas expansões é a implantação de um sistema de monitoramento que

verifique não só a evolução da expansão do concreto, como também a eficiência das obras de reparo que, eventualmente, venham a ser implementadas.

O sistema de monitoramento implantado após a evidência da RAA, praticamente se faz para avaliar o residual de reação que possa existir, pois esta implantação normalmente ocorre após o fenômeno já ter causado perturbações e anormalidades, mas quando instalada no início da obra, torna-se muito útil para a indicação do fenômeno (ANDRIOLO, 1997).

Para Goulart Neto et al. (1998) as investigações da deterioração, tanto por monitoramento no campo quanto por experimentos laboratoriais, podem auxiliar na adoção de algumas medidas corretivas, com o objetivo de minimizar os danos causados pelas expansões, apesar de não existir ainda uma maneira efetiva e econômica de interromper a evolução da RAA, uma vez iniciado o processo.

As observações comumente realizadas, com o enfoque na elaboração de um plano de instrumentação de barragens afetadas pela RAA, de acordo com Silveira (2006), consistem em:

- Verificar, nas barragens mais antigas, se o concreto está em fase de expansão e quantificar a taxa de expansão anual;
- Verificar a evolução da taxa de expansão do concreto segundo as três direções ortogonais entre si;
- Possibilitar a calibração dos modelos matemáticos de análise do comportamento da barragem, visando o estudo de eventuais soluções corretivas;
- Verificar a eficiência das obras de reparo executadas e
- Acompanhar a evolução da deformabilidade do concreto com o tempo.

As grandezas mais comuns a serem observadas para o estabelecimento do plano de instrumentação de barragens afetadas pela RAA, segundo Silveira (2006) são:

- Alçamento da crista da barragem;
- Deslocamentos horizontais da crista;
- Deformações internas da estrutura;
- Deslocamentos diferenciais entre blocos;
- Deslocamentos angulares da barragem;
- Subpressões na interface concreto/rocha e

- Vazões de drenagem.

Além dessas medidas, os deslocamentos diferenciais das fissuras também são grandezas de importância a serem observadas. É útil na verificação da evolução das expansões devidas à RAA, refletidas diretamente no deslocamento contínuo e irreversível da fissura. Além disso, o monitoramento de locais específicos, como estruturas diretamente interligadas aos equipamentos mecânicos e hidrodinâmicos da usina, é de suma importância devido à necessidade de intervenção antecipada das obras de reparo.

Das medições descritas, a maior importância fica concentrada na observação das expansões do concreto, ou seja, as medições que fornecem as deformações da estrutura (SILVEIRA, 2006). Isto se deve ao fato das expansões causadas pela RAA serem as responsáveis pela deterioração estrutural do concreto.

De acordo com Silveira (1999) a escolha de instrumentos de monitoramento com a precisão adequada é fundamental para o sucesso do plano de auscultação da estrutura. Ainda de acordo com o autor, o emprego da técnica e a precisão dos equipamentos a serem empregados dependem da ordem de grandeza dos deslocamentos que estão acontecendo na estrutura.

A seguir são fornecidos os principais instrumentos de auscultação utilizados para a medida das grandezas, tendo por base os principais efeitos causados pela RAA.

3.2.1.1 *Deslocamentos diferenciais entre blocos e fissuras*

A medição dos deslocamentos diferenciais é um procedimento usual na observação de estruturas de concreto. É um parâmetro útil na observação das características relacionadas ao deslocamento diferencial entre blocos e/ou fissuras. Segundo Silveira (2003), os objetivos básicos desta medição são:

- Acompanhar a abertura das juntas de contração a serem injetadas (escolha da época mais adequada para a injeção), bem como sua eficiência, por meio da determinação do volume de calda injetada;
- Verificar as regiões mais deformáveis da fundação, pelo acompanhamento dos recalques diferenciais entre blocos;

- Verificar a influência da movimentação das juntas de contração sobre equipamentos e tubulações que as atravessam, por meio da análise da ordem de grandeza destes deslocamentos e,
- Verificar se os deslocamentos diferenciais entre blocos não foram excessivos.

De acordo com Silveira (1999), a ocorrência de deslocamentos diferenciais permanentes, nas juntas de contração entre blocos, independente do final do período construtivo, é uma das peculiaridades da RAA.

No caso de estruturas afetadas pela RAA, esta observação é útil para a verificação da continuidade das expansões que agem no concreto pelo acompanhamento dos deslocamentos contínuos e crescentes.

Os principais instrumentos utilizados para a medição dos deslocamentos diferenciais relativos entre blocos e fissuras são os medidores triortogonais (MT), bases de alongômetro e bases para medição dos movimentos de fissuras (BT).

✓ Medidores Triortogonais (MT)

O medidor triortogonal consiste de um sistema de apoio constituído em aço inoxidável, com braços orientados em três direções ortogonais e um relógio comparador adaptado (COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP, 2009). A resolução e o campo de medida variam com o tipo de do relógio comparador utilizado. Usualmente é utilizado relógio comparador com resolução de 0,01 mm e campo de medida de 10 mm. O medidor é fixado convenientemente na estrutura de concreto por meio de um gabarito de instalação.

Estes medidores possibilitam medida em três direções de deslocamentos, que são:

- Abertura e fechamento (A/F);
- Recalque diferencial (Recalque/Elevação – R/E) e
- Deslizamento horizontal (Avanço/Recuo – A/R).

A Figura 2 esquematiza o medidor triortogonal instalado em uma fissura com as posições de leitura de deslocamentos adaptadas para o encaixe do relógio comparador.

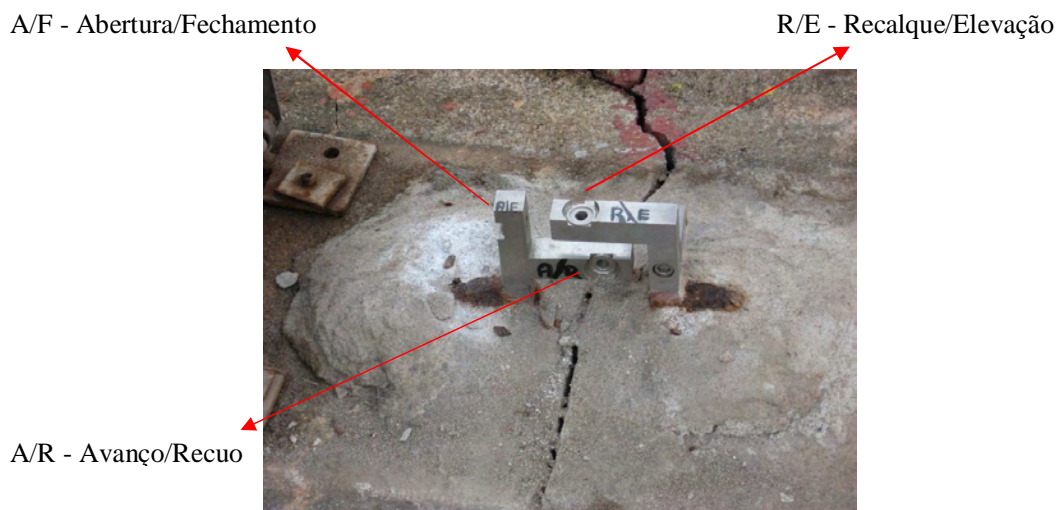


Figura 2: Posições de leitura do medidor triortogonal

A Figura 3 ilustra um modelo de medidor triortogonal, com o relógio simulando a posição de leitura, instalado em um protótipo de junta de contração. Este esquema está disponível para visitação no Laboratório CESP de Engenharia Civil - LCEC, em Ilha Solteira.



Figura 3: Simulação de medidor triortogonal instalado em uma junta de contração

✓ Bases para medição dos movimentos de fissuras (BT)

As bases para medição dos movimentos de fissuras são confeccionadas no material alumínio. A instalação é realizada ao longo das fissuras por meio de um gabarito aferido para esta finalidade. Um conjunto de BT instalado em uma fissura pode ser verificado na Figura 4.

As BT permitem a medição dos deslocamentos de abertura/fechamento. As leituras são obtidas com um dispositivo com relógio comparador acoplado, cujo campo de leitura é de 5,0 mm e a resolução de 0,001 mm.

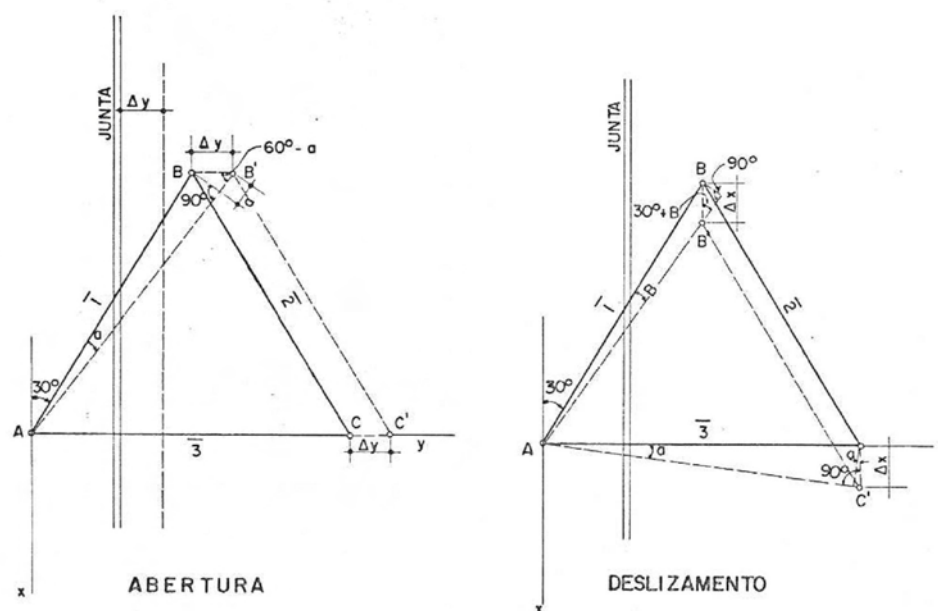


Figura 4: Conjunto de BT instalado em fissura

✓ Bases de alongâmetro

O alongâmetro utiliza uma base triangular de referência, posicionada na junta ou fissura. Para a obtenção das leituras, é utilizado um dispositivo com um relógio comparador acoplado. Usualmente é utilizado um relógio comparador com campo de leitura de 5,0 mm e resolução de 0,001 mm.

Este aparelho pode ser verificado na Figura 5.



(a) Direções de deslocamentos



(b) Triangulação instalada em uma parede



(c) Aparelho de leitura

Figura 5: Base de alongômetro
Fonte: Adaptado de Matos (2002)

Segundo Matos (2002), os medidores triortogonais são preferíveis para a realização do monitoramento referenciado, por permitirem a obtenção dos deslocamentos completos nas três direções ortogonais, uma vez que a base de alongômetro necessitaria da instalação de pinos base no piso e na parede para a obtenção das medidas nas três direções.

3.2.1.2 Deslocamentos verticais relativos

A medição de deslocamentos verticais relativos é realizada, geralmente, por extensômetros múltiplos de hastes. A principal finalidade deste instrumento é a medição de recalques de fundação. Segundo U. S. Army Corps of Engineers (1994) e Silveira (2003), pela

instalação de hastes de tamanhos diferentes, é possível monitorar o movimento relativo das várias zonas da fundação, com distâncias diferenciadas da cabeça de leitura.

Os extensômetros são compostos, basicamente, de hastes metálicas, geralmente de aço inoxidável, chumbadores, cabeça de leitura e relógio comparador. Os deslocamentos relativos entre o ponto de ancoragem e a cabeça de leitura são transmitidos pelas hastes e obtidos por meio de leituras feitas com um relógio comparador (COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP, 2009). O diâmetro do furo para a instalação do equipamento depende da quantidade de hastes que serão instaladas.

Para a medição dos deslocamentos verticais, as hastes dos extensômetros devem ficar verticalizadas e não deve existir atrito entre estas e as paredes do furo de instalação. Isto poderá ocasionar erros que tornam a interpretação dos dados impossível (U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1994).

Segundo Silveira (2006), os extensômetros múltiplos constituem os instrumentos mais apropriados para a auscultação de barragens com RAA. O autor destaca a importância da instalação de extensômetros de hastes segundo as direções vertical, longitudinal e transversal da barragem, haja vista as diferenças nas taxas de expansão do concreto decorrentes da influência das tensões confinantes. Estes equipamentos possibilitam a medição dos deslocamentos internos das estruturas e, conseqüentemente, podem-se adquirir, com boa precisão, as deformações ao longo das três direções ortogonais.

De acordo com Orlowski (2003), a expansão resultante da RAA não ocorre de maneira uniforme no interior de estruturas. Isto motiva a instalação de extensômetros com hastes de tamanhos diferentes, para verificar as partes onde a RAA atua com maior intensidade. Segundo Silveira (1999) é usual a instalação de extensômetros com um mínimo de três hastes. A inferior deverá ser instalada na fundação, logo abaixo do contato concreto/rocha, a intermediária acima deste contato e a superior com, no mínimo, 10 m de comprimento, para possibilitar a correção das influências térmicas ambientais.

A locação das hastes dos extensômetros deve ser realizada com o cuidado de procurar caracterizar os trechos da barragem com deformabilidade diferenciada, levando em conta a umidade do concreto, a geometria das peças, as tensões confinantes e as influências térmicas ambientais (SILVEIRA, 1999).

A Figura 6 traz um modelo de instalação de extensômetros de haste em furo de sondagem e as partes que o compõem.

Os relógios comparadores utilizados para a medição dos deslocamentos podem ter campo de medida de 10 mm ou mais e sensibilidade de 0,01 mm ou 0,001 mm. A escolha do campo de medida e da precisão ideal depende da ordem de grandeza dos deslocamentos que se esperam medir.

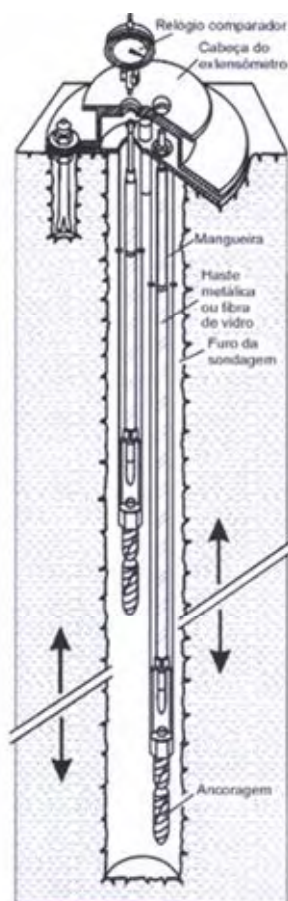


Figura 6: Esquema de instalação do extensômetro de haste em furo de sondagem
Fonte: Silveira (2003)

3.2.1.3 Deslocamentos horizontais relativos

Os deslocamentos horizontais relativos em barragens são medidos, comumente, por meio da utilização de pêndulos diretos e invertidos. Os pêndulos diretos fazem a medição dos deslocamentos da crista em relação à base do corpo da barragem e os pêndulos invertidos medem os deslocamentos da base em relação a um ponto da fundação, e tem como finalidade

principal e original a medição dos deslocamentos cisalhantes na interface concreto/rocha e nas diferentes camadas da fundação.

Os pêndulos diretos consistem em um fio de prumo de aço inox com diâmetro de 1 mm, cuja extremidade superior é fixada a uma base e a inferior a um peso de aproximadamente 30 kg, imerso em um recipiente com óleo de alta viscosidade (COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP, 2009). A função do óleo é estabilizar rapidamente os deslocamentos. De acordo com Silveira (2003), estes equipamentos são instalados a partir de tubulações verticais localizadas nas estruturas, durante o período construtivo e a tubulação utilizada deve ser o mais vertical possível para assegurar que o fio fique centralizado e permita um amplo campo de leitura para os deslocamentos horizontais.

Os pêndulos invertidos são instalados a partir de furos de sondagem de grande diâmetro ou poços de prospecção (SILVEIRA, 2003). O sistema de fixação do fio é invertido, em relação ao pêndulo direto. A extremidade inferior é fixada na fundação (parte mais profunda da sondagem) e a extremidade superior é fixada em um flutuador imerso em recipiente com óleo. O fio deve ser mantido tensionado e verticalizado para a obtenção de leituras corretas.

Segundo Silveira (2003), deve-se sempre procurar instalar ambos os tipos de pêndulos nos mesmos blocos-chave da barragem. Com esta sistemática é possível comparar os deslocamentos horizontais medidos pelo sistema de pêndulos com os medidos geodesicamente.

Quando a instrumentação é prevista em projeto, a localização é garantida durante a construção. No entanto, depois de construída a estrutura e caracterizada a necessidade de instalação deste tipo de instrumento, é necessário identificar localizações possíveis ou até mesmo recorrer a realização de perfurações na estrutura, por sondagem rotativa.

As leituras dos deslocamentos horizontais podem ser obtidas em duas direções ortogonais, para o pêndulo direto e invertido. Estas são realizadas empregando um coordenômetro micrométrico, composto por um micrômetro de resolução de 0,01 mm e encaixe em Y confeccionado em aço invar. Os deslocamentos são relativos à parede de fixação da base de leitura, onde o coordenômetro é fixado. Quando o micrômetro toca o fio, um circuito eletrônico é acionado e emite um som.

A Figura 7 ilustra o esquema de um pêndulo direto instalado em uma sala de exposição no Laboratório CESP de Engenharia Civil e as Figuras 8 e 9 mostram, respectivamente, o detalhe da base de leitura e do coordenômetro.



Figura 7: Simulação do esquema de instalação do pêndulo direto



Figura 8: Base de leitura

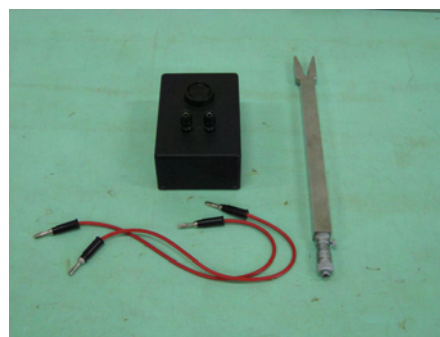


Figura 9: Coordenômetro

A utilização de ambos os tipos de pêndulos como instrumentos para medição de deslocamentos em estruturas com RAA são de suma importância, devido ao efeito expansivo provocado pela reação, onde as estruturas tendem a expandir em todas as direções, caso não haja confinamento. Ademais, a medição dos pêndulos não se restringe somente a deslocamentos horizontais. Silveira (2006) aproveitou os pêndulos invertidos, instalados a partir de furos de sondagem na UHE Moxotó, que está afetada pela RAA, para medir deslocamentos verticais. Isto foi possível pela instalação de um pequeno disco metálico fixado ao fio de aço do pêndulo. Estes deslocamentos foram medidos com a utilização de um relógio comparador. Dessa forma, o pêndulo funcionou como um extensômetro de fio vertical.

As partes que compõem o pêndulo invertido e o esquema de montagem estão esquematizadas na Figura 10.

Por meio da instalação de pêndulos diretos e invertidos, extensômetros múltiplos e medidores de junta em todas as juntas de contração entre blocos, o controle dos deslocamentos relativos é quase completo (SILVEIRA, 2003).

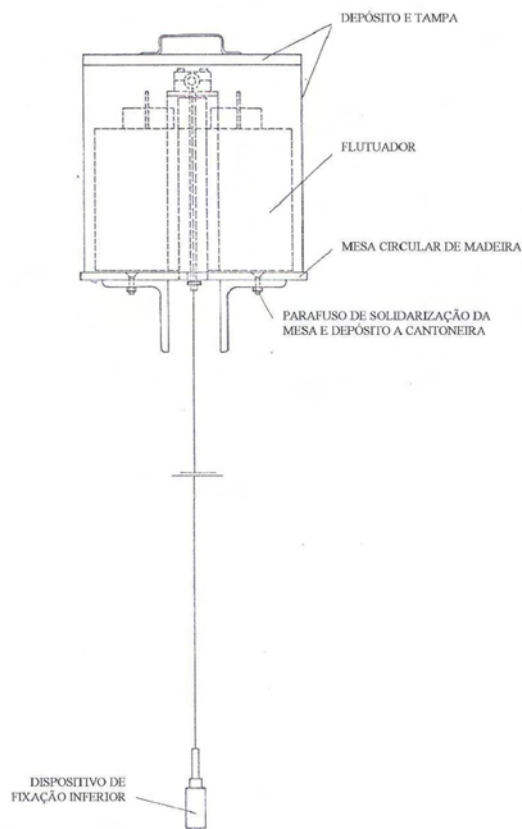


Figura 10: Partes componentes do pêndulo invertido
Fonte: Matos (2002)

3.2.1.4 Deformações

De acordo com Silveira (1999) a medida das deformações é de suma importância em barragens com RAA, haja vista que por meio destas irá se conhecer as reais taxas de expansão do concreto. Segundo o mesmo autor, as rosetas de deformímetros e os deformímetros corretores são instrumentos de grande valia para a observação da grandeza em destaque. Porém, em barragens afetadas pela RAA e que não se dispõe destes equipamentos, a medição das deformações é realizada por extensômetros múltiplos instalados em furos de sondagem, onde a medida de deformação é conseguida de forma indireta, por meio da leitura de deslocamento realizada pelo extensômetro.

3.2.1.5 Deslocamentos angulares

De acordo com Silveira (1999), as expansões no concreto causadas pela RAA provocam distorções nas estruturas, o que vem a causar perda de verticalidade do eixo do conjunto turbina/gerador, o que torna importante monitorar os deslocamentos angulares na região dos equipamentos de geração, assim como a inclinação das palhetas do distribuidor.

A instalação de pêndulos diretos ou invertidos próximos dos equipamentos de geração permite a observação dos deslocamentos angulares destas peças. Na região da tampa da turbina podem ser utilizados nivelamentos de precisão ou medidas clinométricas (SILVEIRA, 1999).

3.2.1.6 Subpressões

Segundo Silveira (1999), a análise de modelos matemáticos de barragens com tomada d'água e casa de força justapostas indica uma tendência de abertura no contato concreto/rocha, provocada pelas expansões do concreto. Conseqüentemente, esta tendência de abertura poderá resultar em subpressões mais elevadas, assim como em perda da resistência ao cisalhamento neste contato. Ainda, a expansão do concreto tende a desenvolver, ao longo do contato concreto/rocha, tensões de cisalhamento, favorecendo a aberturas de juntas no maciço.

A medição das subpressões pode ser realizada por piezômetros. Basicamente, os tipos de piezômetros existentes são os de tubo aberto, tubo fechado, pneumático e elétrico. As descrições destes equipamentos foram encontradas em Companhia Energética de São Paulo – CESP (2009).

✓ Piezômetro de tubo aberto

Consiste de um tubo de PVC com a extremidade inferior perfurada e envolta por uma manta geotêxtil. A coluna d'água no tubo é equivalente à pressão externa atuante. A leitura é feita introduzindo no tubo um sensor elétrico com cabo graduado.

✓ Piezômetro de tubo fechado

É o piezômetro de tubo adaptado para uso em barragens de concreto, no qual a leitura é feita com um manômetro.

✓ Piezômetro pneumático

É um dispositivo cilíndrico metálico contendo pedra porosa, diafragma e conexões para a fixação da tubulação de nylon. A leitura é efetuada em painel próprio, aplicando nitrogênio até haver equilíbrio entre as pressões interna e externa.

✓ Piezômetro elétrico

Consiste em um dispositivo cilíndrico metálico dotado de pedra porosa e diafragma, instrumentado com extensômetros elétricos de resistência. A pressão externa aplicada ao diafragma fornece uma saída elétrica proporcional, que é lida com equipamento específico.

3.2.1.7 Vazões de drenagem

A expansão no concreto causada pela RAA causa intensas fissurações e a abertura das juntas de concretagem, implicando no aumento das vazões de infiltração com o tempo. Portanto, de acordo com Silveira (1999), é recomendado realizar a medição das infiltrações do concreto e de suas fundações, em barragens afetadas pela RAA.

As vazões de drenagens são obtidas por medidores de vazão situados em locais específicos.

3.2.2 Medições por técnicas geodésicas

Além dos instrumentos especificados para a medição de deslocamentos horizontais e verticais, outra técnica, usualmente empregada, é o monitoramento por meio de técnicas geodésicas.

Segundo Nadal et al. (2006), o monitoramento de um ponto por técnicas de posicionamento geodésico consiste em determinar e comparar as coordenadas do mesmo ponto em duas épocas distintas, e verificar se, dentro de certo nível de confiabilidade, houveram variações significativas nestas coordenadas. A aplicação de técnicas geodésicas permite a determinação dos deslocamentos absolutos da estrutura, desde que a referência esteja localizada fora da área de influência da barragem.

A avaliação dos deslocamentos horizontais pode ser realizada por levantamento planimétrico, ou seja, quando se avaliam os deslocamentos no plano topográfico. Os deslocamentos verticais são avaliados por levantamento altimétrico.

Algumas técnicas de posicionamento que podem ser utilizadas para fins de monitoramento, segundo Zocolotti Filho (2005), são: triangulação e trilateração geodésicas, poligonação, nivelamento geométrico de precisão e determinação de coordenadas utilizando GPS. Para o controle planimétrico e altimétrico de grandes estruturas é comum utilizar a combinação destas técnicas. O levantamento planimétrico é comumente realizado pelos métodos de triangulação e trilateração.

Os instrumentos mais utilizados, de acordo com Granemann (2005), para a realização da medição por algumas das técnicas descritas são: níveis, estações totais, miras de invar, trenas, fitas de invar e gravímetros. Segundo o mesmo autor, atenção especial deve ser dada à confiabilidade das medidas por instrumentação geodésica. A precisão dos equipamentos deve ser conhecida, bem como a calibração deve ser realizada por instituições oficiais ou credenciadas para garantir a confiabilidade das medições.

3.2.2.1 *Triangulação e trilateração geodésicas*

Segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas - IBGE (1983), a triangulação geodésica é o procedimento em que se conseguem figuras geométricas a partir de triângulos justapostos e sobrepostos, formados com a medição dos ângulos de cada vértice.

A trilateração é semelhante à triangulação, a diferença é que são observados os lados, ao invés dos ângulos, trabalhando-se com distâncias, que podem ser medidas por meio de estações totais que atingem precisões da ordem de $\pm (1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ (GRANEMANN, 2005). A partir da formação de uma rede básica de monitoramento formada por triangulação ou trilateração, são determinadas as coordenadas dos pontos a serem monitorados.

Para U. S. Army Corps of Engineers (2002), quando são medidas somente distâncias, são empregadas técnicas de trilateração para computar movimentos absolutos. Se na medida forem necessárias observações angulares, utilizando teodolitos ou estação total eletrônica, métodos de triangulação são utilizados. Estas técnicas podem chegar à precisão de $\pm (0.5 \text{ mm} + 4 \text{ ppm} (4 \text{ mm/km}))$ quando da utilização de instrumentos convencionais.

3.2.2.2 *Nivelamento geométrico*

De acordo com Krelling (2006) uma das técnicas geodésicas aplicadas ao monitoramento de deslocamentos verticais é o nivelamento geométrico de precisão, onde o desnível é medido

entre dois pontos a partir da leitura de miras graduadas efetuadas com um nível. Os equipamentos empregados são os níveis (óticos-mecânicos e digitais) e as miras de invar.

Segundo Silva (2003), os dados são obtidos por meio de visadas horizontais. É criado um plano horizontal de referência e planos verticais. A visada é realizada nestes planos verticais, onde a diferença de cota com o plano de referência é a leitura que se quer obter. Os resultados dos nivelamentos, efetuados em épocas diferentes, permitem a determinação dos deslocamentos verticais da estrutura.

Os estudos de Gagg (2007), a respeito do monitoramento das subsidências na barragem da hidrelétrica Governador Bento Munhoz da Rocha, no Rio Iguaçu-Paraná, mostraram que o nivelamento geométrico é uma das técnicas mais consistentes para a obtenção dos valores de altitude ou diferença de altitude.

3.2.2.3 Poligonação

De acordo com Zocolotti Filho (2005) o levantamento geodésico utilizando a técnica de poligonação consiste do levantamento de uma poligonal, por meio do método do caminhamento, percorrendo-se o contorno de um itinerário definido por uma série de pontos, medindo-se todos os ângulos e lados e uma orientação inicial. A partir destes dados e de uma coordenada de partida, é possível calcular as coordenadas de todos os pontos que formam a poligonal. Os instrumentos de medição usualmente empregados para a poligonação são as estações totais.

3.2.2.4 Determinação de coordenadas por GPS

O sistema de posicionamento por satélite determina a coordenada de um ponto por meio do rastreamento e processamento de sinais enviados por uma constelação de satélites que orbitam ao redor da Terra (KRELLING, 2006).

Krelling (2006) cita como principais vantagens na utilização do sistema GPS, a facilidade na obtenção de dados e precisão na determinação das coordenadas, podendo chegar a precisões de ordem milimétricas para posicionamentos relativos. Porém, segundo U. S. Army Corps of Engineers (2002), o monitoramento por GPS necessita da visibilidade de, pelo menos, quatro satélites durante a realização das leituras. Esta exigência pode fazer o GPS impróprio em áreas de vegetação densa.

3.2.3 Outros equipamentos medidores de deslocamento

3.2.3.1 Laser

A sigla Laser em inglês significa Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ou seja, é um dispositivo que produz radiação eletromagnética. A luz laser foi descoberta no início dos anos 1960 e possui características especiais que a tornam singular. As principais características são (BAGNATO, 2001):

- A luz laser é monocromática;
- Possui alta intensidade;
- O feixe de luz é direcional e;
- A luz laser é coerente (propagação de onda coerente).

O raio laser por ser uma luz monocromática é visível como uma linha, o que significa possuir apenas um comprimento de onda, enquanto que a luz incandescente forma vários comprimentos de onda.

Todo feixe propaga-se na mesma direção, havendo um mínimo de dispersão. Esta característica é extremamente importante para uma série de aplicações em comunicação, na indústria, na eletrônica, etc.

Por ser um feixe de luz, esse conjunto de características forma um dispositivo muito versátil, com aplicações nas mais diversas áreas da ciência e tecnologia, como (SCRUBY; DRAIN, 1990):

- Espectroscopia;
- Metrologia;
- Inspeção;
- Comunicação;
- Sistemas de armamentos e cirúrgicos;
- Aplicações industriais (corte de metais, medição de distâncias, diâmetros);
- Aplicações comerciais (comunicação por fibra ótica, leitores de código de barras) e
- Aplicações domésticas (aparelhos leitores de CD, DVD, etc.)

Basicamente, os instrumentos de medição recentes, contam com a forma mais simples de tecnologia que é a medição direta baseada no reflexo de luz e contam com a participação dos últimos recursos da informática para processar os cálculos e transmitir os dados (FRADE, 2008).

Segundo Frade (2008), a tecnologia de medição a laser tem evolução recente e sua aplicação é crescente nos instrumentos triviais do dia a dia. Esta tecnologia tem sido utilizada para a fabricação de equipamentos portáteis para rápidas medições de distâncias, nivelamentos e ângulos. Com isso o laser está ganhando crescente participação na construção civil, nos laboratórios, nas fábricas e nas oficinas mecânicas.

O U. S. Army Corps of Engineers (1980) utilizou o sistema de medição com raio laser no campo do monitoramento por técnicas geodésicas de alinhamento. Foram desenvolvidos instrumentos para encontrar as deflexões das estruturas da barragem devido às mudanças do nível d'água.

Devido às vantagens conseguidas com a utilização dos raios laser em tecnologias para medição, Bueno, Silva e Valentin (2007) empregaram esta tecnologia para o desenvolvimento de um sensor de deslocamento para a medição do alongamento em ensaio de tração em geossintéticos. Isto evidencia a diversidade de aplicação do raio laser para a medição de grandezas.

A pesquisa em questão procura adaptar o medidor de deslocamento a laser, de uso industrial, para a aplicação em medição de deslocamentos relativos em barragens e/ou outros empreendimentos afetadas pela RAA, em locais especiais, onde os instrumentos comuns não conseguem ser aplicáveis.

As aplicações típicas dos sensores medidores de deslocamento de uso industrial consistem no controle de qualidade de peças e equipamentos; na linha de montagem de automóveis; na conformação de rodas de alumínio; nas medidas de espessura; nas distâncias do veículo ao solo e outras aplicações que requerem elevada precisão (Micro-Epsilon, 2007a)

As principais vantagens de aplicação destes equipamentos são:

- Elevada precisão e resolução;
- A leitura efetuada é transformada em saída elétrica, o que permite a automatização das leituras;
- O monitoramento é realizado sem contato com o objeto de leitura;

- O design é compacto e
- Dependendo da classe que os sensores estiverem inseridos, são resistentes a locais insalubres.

A desvantagem para a utilização direta, em monitoramento de deslocamentos de barragens, é a distância de medição do laser. Para resoluções elevadas, a distância do equipamento à superfície a ser medida é mínima, sendo, portanto, necessária a sua adaptação.

3.2.3.2 Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

Os LVDTs são dispositivos eletromecânicos utilizados para a medição de deslocamento linear. O funcionamento deste aparelho é baseado em três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. O aparelho fornece um sinal de saída linear, proporcional ao deslocamento do núcleo, que está fixado ou em contato com o que se deseja medir (BRUSAMARELLO, 2008).

Basicamente, o sensor LVDT é composto pelos seguintes elementos, que estão esquematizados na Figura 11 (BRUSAMARELLO, 2008):

- Bobina excitadora ou primária;
- Duas bobinas secundárias;
- Núcleo ferromagnético móvel;
- Eixo não-ferromagnético acoplado ao núcleo;
- Estrutura isolante para as bobinas e
- Carcaça metálica para a blindagem e fornecimento de resistência mecânica.

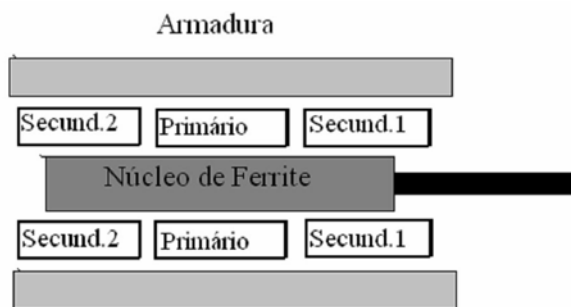


Figura 11: Esquematização simplificada da formação do LVDT
Fonte: Brusamarello (2008)

Segundo Almeida (2004) o movimento do núcleo do LVDT, a partir de um ponto nulo, provoca uma indutância diferencial nas bobinas secundárias. Com isso a amplitude da tensão de saída torna-se dependente da posição do núcleo. Sendo assim, para um determinado campo de deslocamento, a relação entre o sinal de saída e o deslocamento correspondente é linear. Para esta medição, uma corrente alternada é aplicada na bobina primária A, fazendo com que uma tensão seja induzida em cada bobina secundária B, proporcional à indutância mútua com a bobina primária (LVDT, 2009). A Figura 12 ilustra o corte de um LVDT, com o posicionamento das bobinas A e B.

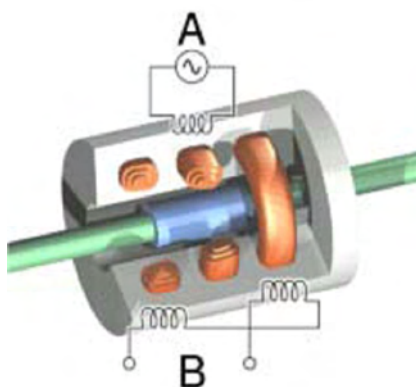


Figura 12: Vista em corte de um LVDT
Fonte: LVDT (2009)

Os LVDTs podem ser utilizados para a medida de deslocamentos em ensaios estáticos ou quase estáticos, sendo aplicável a quase todos os empreendimentos de engenharia civil, porém, necessitam de recursos de amplificação eletrônica e conversão de dados, pois não possuem indicação direta de deslocamento (ALMEIDA, 2004).

Oh e Kim (2004) utilizaram os LVDTs para a medida da deformação em ensaios de vigas de concreto e estes mostraram resultados satisfatórios de comportamento.

Ambos os equipamentos, laser e LVDT, são transdutores de sinais, ou seja, são instrumentos que fazem a conversão de grandezas mecânicas, como deslocamentos, em sinais elétricos equivalentes (BEKEIERMAN; BIEBERBACH; FERREIRA, 2008). O primeiro se enquadra na classificação de transdutores de sinais óticos e o segundo como transdutores de sinais indutivos.

3.2.4 Inspeção e análise visual

De acordo com Piasentin (2003), a instalação da instrumentação é imprescindível para avaliar a segurança das barragens, mas é preciso que seja complementada pela observação cuidadosa das estruturas durante as inspeções no local.

Segundo Bernardes (2000), além das informações obtidas por meio de instrumentos de auscultação, certas evidências de que o concreto esteja afetado por um processo reativo são detectáveis visualmente. Aliada à interpretação cuidadosa dos dados da instrumentação, as inspeções visuais constituem ferramenta útil no diagnóstico precoce da RAA.

As inspeções visuais podem ser classificadas de vários tipos e frequências, como (PIASENTIN, 1999):

- Inspeções rotineiras realizadas pela equipe de leitura da instrumentação. Neste caso, há relato de alguma anomalia observada e da condição dos instrumentos de leitura;
- Inspeção periódica, realizada por engenheiro experiente a cada três ou quatro meses;
- Inspeção de supervisão efetuada por consultores a cada três ou quatro anos quando eventos especiais requeiram uma análise cuidadosa das estruturas e
- Inspeções extraordinárias quando ocorre um fato excepcional, como uma enchente, terremoto ou comportamento anormal da obra.

Segundo Comitê Brasileiro de Grandes Barragens - CBGB (1998), a vistoria de uma barragem inclui:

- Exame visual das faces do concreto, tanto acima quanto abaixo no nível d'água;
- Amostragem, ensaio e a estimativa da qualidade do concreto e armações;
- Inspeção de todos os elementos estruturais e,
- Verificação da ocorrência de reações expansíveis como a reação álcali-agregado.

Na inspeção é analisado também, de acordo com Hoyo e Gutierrez (1994):

- As condições à jusante (se há surgências de água de percolação, etc.);
- Fissuras e umidade na superfície;
- Cor da água de drenagem e existência de sólidos suspensos;
- Condições dos equipamentos instalados na barragem;

- Comunicação, equipamentos e dispositivos de segurança e
- Características internas ou da superfície das estruturas que se correlacionam com a segurança das barragens.

Para Hoyo e Gutierrez (1994), a inspeção visual empreendida por engenheiros experientes permite a observação de algumas irregularidades no desempenho das barragens, antes de serem detectados nos equipamentos de monitoramento, como, por exemplo, a abertura de uma fissura.

Uma vez confirmada a existência de RAA em determinado empreendimento, a inspeção visual tem importância no sentido de verificar o quadro de fissuração, deslocamentos do concreto, desalinhamentos excessivos, condições de funcionamento dos equipamentos, entre outros.

Os resultados das inspeções devem ser registrados em relatórios periódicos contendo fotos, desenhos e gráficos de maneira a se fazer comparações com o passar dos anos, permitindo verificar lentas modificações nas estruturas observadas (PIASANTIN, 2003).

3.2.5 Modelagem matemática

Para completar o monitoramento e a análise da segurança estrutural, pode ser feita uma modelagem matemática tridimensional da estrutura com o intuito de prever o desempenho do empreendimento e se há riscos relacionados à segurança estrutural.

Segundo Bernardes e Echeverria (2005) a interpretação dos resultados da instrumentação exige o estabelecimento de modelos e critérios com o objetivo de explicar o comportamento estrutural da barragem. A compreensão do desenvolvimento das expansões permite emitir parecer sobre as condições de segurança da barragem, bem como verificar a necessidade de execução de obras de reparo ou preventivas.

Ainda segundo os mesmos autores, a técnica da retroanálise é aplicável tanto à interpretação dos resultados de observações de barragens quanto à identificação e caracterização das expansões devidas às reações álcali-agregado. O emprego desta técnica permite acompanhar a evolução das expansões, importante na tomada de decisões sobre medidas corretivas e preventivas.

Uma vez conhecidas as causas e efeitos que o fenômeno produz, é necessário introduzir os efeitos em um modelo matemático para quantificar as mudanças irreversíveis e verificar a continuidade das mesmas. Para Hoyo e Gutierrez (1994), uma modelagem típica, em elementos finitos, no qual as ações normais são introduzidas com as devidas precauções, podem fornecer uma previsão da segurança da barragem antes das mudanças acontecerem.

Os cálculos utilizando o método dos elementos finitos em combinação com os testes em testemunhos de concreto, têm se mostrado efetivos na avaliação das condições da estrutura e identificação dos aspectos que requerem monitoramento, intervenção e estudos adicionais (MACMILLAN; MCPHAIL, 2000).

A modelagem matemática da tomada d'água da UHE Jaguari será feita em trabalhos posteriores, podendo ser aferida pelos parâmetros observados com instrumentos instalados, após, pelo menos, um ano de monitoramento, visto que este período elimina os efeitos das variações sazonais no concreto.

3.3 PANORAMA DE CASOS

As conseqüências da reação álcali-agregado afetam estruturas de vários países. Há relatos na literatura de mais de 100 casos de barragens afetadas pela RAA. De acordo com Pappalardo Junior (1998), aproximadamente cinquenta por cento dos casos relatados ocorreram nos Estados Unidos e Canadá e doze por cento localizam-se na África. A relação de casos indicada por Marques (2009) confirma estes números e indica que aproximadamente dezesseis por cento destes estão no Brasil.

O comportamento expansivo das estruturas, causado pela RAA, é diferente dependendo do tipo de sistema construtivo. Em barragens de gravidade as taxas de expansão do concreto são maiores, em média $60 \cdot 10^{-6}$ /ano, com variações entre 30 e $90 \cdot 10^{-6}$ /ano, se comparadas com barragens em arco, com $15 \cdot 10^{-6}$ /ano. Esta diferença está associada às tensões de confinamento a que estão sujeitas as barragens em arco, o que tende a limitar a livre expansão do concreto (SILVEIRA, 1997).

Uma descrição de alguns casos, em diferentes países, é fornecida no sentido de verificar os relatos das principais conseqüências observadas e das medidas de monitoramento e controle das expansões.

3.3.1 Casos internacionais

3.3.1.1 E.U.A.

- *Fontana*

Fontana foi construída entre os anos de 1941 e 1945, no Rio Little Tennessee, Carolina do Norte. Segundo Pappalardo Junior (1998), em 1972, 27 anos após o término da construção, foram observadas as primeiras fissuras decorrentes da RAA. Após a descoberta da reação foram instalados pêndulos diretos em diversos poços da barragem para a observação dos deslocamentos de montante e foi desenvolvido um modelo matemático para a observação do comportamento estrutural.

Segundo Saouma e Xi (2004), o concreto da barragem se apresenta em franca expansão e, o centro da crista da barragem movimentou-se 115,0 mm para montante.

Uma das medidas para conter a degradação causada pela RAA foi a realização de um corte transversal na barragem para aliviar a tensão induzida, em 1976. Os medidores de junta instalados na área do corte indicaram um fechamento da ordem de 5 mm/ano, o que exigiu novo corte em 1983 (SILVEIRA, 1999).

- *Hiwassee*

As evidências da RAA também estão em todos os segmentos da estrutura da barragem em gravidade de Hiwassee, localizada no Rio Hiwassee, no Estado do Tennessee, construída entre 1936 e 1940. As principais deteriorações causadas pela RAA foram fissurações, deformações excessivas e irreversíveis e aumento das tensões com o tempo. A instrumentação instalada no início da construção consta de células de subpressão, fios de prumo e medidores de vazão nas galerias de drenagem. Para monitorar as anomalias, desenvolvidas em decorrência da RAA, foram instalados medidores de fissuras, extensômetros, medidores de expansão, inclinômetros e tensômetros (CANARY SYSTEMS, 2008).

Os problemas estruturais causados pela RAA, em Hiwassee, exigiram um programa de reabilitação que incluiu a instalação de cabos verticais de ancoragem, cortes transversais para alívio das tensões e aumento da folga das comportas (PAPPALARDO JUNIOR, 1998).

- *Gene Wash e Copper Basin*

As barragens de arco Gene Wash e Copper Basin estão localizadas em San Bernardino County, Califórnia e foram construídas no final da década de 30. Estas barragens apresentaram comportamentos estruturais semelhantes frente à RAA. Gene Wash apresentou um deslocamento vertical no centro da crista de 90 mm entre os anos 1942 e 1965 (taxa de expansão do concreto de $100 \cdot 10^{-6}/\text{ano}$). Porém, após 1965 este deslocamento foi de apenas 8 mm. Copper Basin apresentou deslocamento vertical da crista da barragem de 90 mm entre os anos 1942 e 1955 (taxa de expansão do concreto de $120 \cdot 10^{-6}/\text{ano}$). Depois de 1955, a taxa de expansão do concreto decaiu e o movimento vertical foi de 21 mm de 1955 a 1995 (representando uma taxa de expansão de $10 \cdot 10^{-6}/\text{ano}$) (HILL, 1995 apud CURTIS, 2000b).

Federal Energy Regulatory Commission (1999) indica que as deteriorações causadas pela RAA em Gene Wash e Copper Basin cessaram e que a reação está em estado dormente.

- *Pointe Du Bois*

MacMillan e Mcphail (2000) detalharam a avaliação e o monitoramento da RAA na hidrelétrica Pointe Du Bois, localizada no Rio Winnipeg.

Fissuras e movimentos na casa de força são relatados, em relatórios de inspeção, desde 1940, aproximadamente 30 anos após a construção. Na ocasião, foram citadas, além de fissuras, movimentações da superestrutura, fissuras e vazamentos na parede jusante da turbina e no poço da galeria e desalinhamento e quebra do eixo da turbina e do gerador.

Em 1992, investigações detalhadas e simulações da RAA em modelagem em elementos finitos (ANSYS), diagnosticaram a RAA como causa principal das deteriorações. Com isso, o grupo KGS, proprietário e operador da usina, recomendou um série de medidas para monitoramento detalhado das movimentações e reparos para prolongamento da vida útil da barragem.

O monitoramento consistiu da medida in situ de tensões e deformações nas estruturas de concreto; monitoramento de fissuras e monitoramento detalhado da casa de força pela instalação de extensômetros, pêndulos e inclinômetros.

3.3.1.2 Canadá

- *Mactaquac*

De acordo com Gilks e Curtis (2003 apud SAOUMA; XI, 2004), Curtis (2000a) e Silveira (1999) as anomalias no complexo hidroelétrico de Mactaquac foram noticiadas pela primeira vez em meados da década de 70 (a construção aconteceu entre os anos de 1964 e 1968), pela abertura crescente de uma junta de contração vertical na casa de força, indicada pela instrumentação instalada. Desde então, foram encontrados vazamentos nas juntas de construção do vertedouro e tomada d' água e desvios na estrutura da comporta. A partir de 1985 várias medidas mitigadoras dos efeitos da RAA tem sido empreendidas, a custos consideráveis.

Para a investigação da movimentação anormal das estruturas foram planejadas instrumentações adicionais, que consistiram na instalação de uma rede de pontos de referência, locada em torno da barragem, para monitoramento vertical e horizontal absolutos e de extensômetros na casa de força para monitorar os movimentos do concreto (HUGHES; CURTIS, 2008). Foi realizada a análise do comportamento estrutural da barragem em elementos finitos (CURTIS, 2000 a). Além destes, Silveira (1999) cita que foram instalados pêndulos invertidos, medidores de juntas, extensômetros múltiplos e bases de convergência.

A taxa de expansão do concreto de Mactaquac é estimada em $120 \cdot 10^{-6}$ /ano a $150 \cdot 10^{-6}$ /ano. A continuidade das expansões levou à necessidade inevitável de reconstrução das estruturas de concreto de Mactaquac. Projeções indicam que a substituição deverá se completada até 2030, para coincidir com o término da vida útil de equipamentos elétricos e mecânicos. Estudos estão sendo realizados nos materiais a serem empregados no novo concreto para prevenir o acontecimento da RAA (THOMAS et al., 2008).

- *Saunders*

A Usina Hidrelétrica de Saunders foi construída no final da década de 50. Em 1972 foram constatadas as primeiras anomalias e, em 1990, o diagnóstico da RAA foi concluído (PAPPALARDO JUNIOR, 1998).

Alguns problemas estruturais e mecânicos decorrentes da RAA, ocorridos na UHE de Saunders são apresentados por Lo e Hefny (1999) que são: distorção (ovalização) no estator; desalinhamento e distorção dos componentes da turbina e do gerador; fissuras e fragmentação

no concreto das vigas e lajes de apoio; abertura das juntas de construção, resultando em significativo vazamento de água na casa de força e distorção e fissuras nas escadas de concreto.

De acordo com Silveira (1999), na década de 90 foi iniciado um amplo plano de monitoração e investigação das soluções corretivas dos efeitos da RAA nesta usina. Isto resultou em um plano de auscultação das deformações do concreto, em uma das unidades geradoras, onde foi realizado um corte das juntas de contração entre blocos. A instrumentação consistiu da instalação de pêndulos diretos, extensômetros múltiplos ao longo de furos de sondagem e nas galerias horizontais, medidores de juntas e termopares. O comprimento total dos furos de sondagem para a instalação dos instrumentos, no bloco, atingiu 256 m.

- *Beauharnois*

A construção de parte da barragem de Beauharnois aconteceu entre 1932 e 1941, sendo finalizada totalmente em 1961. Segundo Durand (1995 apud BÉRUBÉ et al., 2000), desde 1947 há relatos de ações corretivas em deteriorações no concreto. Em 1973 e 1974, respectivamente, foram realizados cortes transversais e longitudinais, para alívio das tensões, induzidas pelo processo de expansibilidade do concreto. Na década de 80, cortes como os anteriores se repetiram. Além dos citados, periodicamente foram realizados reforços das estruturas, selagem e preenchimento das fissuras, reparos nas superfícies deterioradas e realinhamento nos equipamentos de geração.

A Hidro-Québec, proprietária e operadora da usina, tem introduzido uma série de ações para o monitoramento de fissuras, movimentos e deformações, extensos programas de reparos, além de investigações em testemunhos de concreto. Pêndulos invertidos e testemunhos de concreto instrumentados com sensores de corda vibrante são utilizados para o monitoramento da barragem de Beauharnois. Os dados de quinze anos monitoramento da barragem indicam um taxa de expansão vertical de 0,005% ($50 \cdot 10^{-6}$ /ano) e 0,008% ($80 \cdot 10^{-6}$ /ano), dependendo do local (BÉRUBÉ et al., 2000).

3.3.1.3 Portugal

- *Santa Luzia*

O término da construção da barragem de arco de Santa Luzia se deu em 1943. Desde o primeiro enchimento do reservatório, medições geodésicas e de alinhamento foram utilizadas para monitorar os movimentos de elevação e deslocamento para montante da crista da barragem. Em 40 anos de observação, o movimento vertical da crista da barragem foi de 50 mm e o movimento horizontal para montante foi de 30 mm. Para o monitoramento em longo prazo da barragem e melhor caracterização do desempenho da estrutura com RAA, está sendo realizada a observação contínua da deformação, testes de velocidade de pulso ultrassônico e a análise estrutural (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION, 1999).

- *Alto Ceira*

Alto Ceira é uma barragem de arco, concluída em 1949. Assim como a barragem de Santa Luzia, movimentos de alteamento da crista, deslocamento horizontal para montante e intensa fissuração em ambas as faces, começaram logo após o primeiro enchimento do reservatório. Nesta fase, numerosos estudos incluíram inspeção visual, mapeamento de fissuras, testes em testemunhos e análise petrográfica em amostras de concreto para identificar a causa das anomalias, que concluíram ser reação álcali-agregado. O monitoramento da deterioração do concreto está sendo feito por meio da observação das deformações e a análise tridimensional da barragem em elementos finitos. As trincas apresentam profundidades de 60 cm (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION, 1999).

Segundo Curtis (2000b) as barragens de Santa Luzia e Alto Ceira apresentam taxas de deformação verticais de $16 \cdot 10^{-6}$ /ano e $40 \cdot 10^{-6}$ /ano, respectivamente. Ainda, a preocupação com a segurança estrutural da barragem de Alto Ceira levantou a possibilidade de abandonar a barragem e construir uma nova a montante.

- *Pracana*

A barragem de gravidade Pracana foi construída entre os anos de 1948 e 1951. Após 23 anos de existência, a taxa de expansão do concreto foi medida em $260 \cdot 10^{-6}$ /ano e deslocamentos irreversíveis de 1,2 mm/ano foram observados. Em 1980 a operação da

barragem foi interrompida para intervir ações de segurança em suas estruturas (SAOUMA; XI, 2004).

De acordo com Saouma e Xi (2004), os principais tratamentos consistiram de injeção de graute nas fissuras maiores que 0,5 mm e resina epóxi nas outras e impermeabilização da face montante usando membrana de PVC e geotêxtil.

3.3.1.4 *Continente Africano*

- *Kariba*

Os efeitos da RAA na barragem em arco de Kariba são descritos pelos autores Tapfuma et al. (1994). Kariba foi construída entre os anos 1956 e 1959 e está localizada no Rio Zambezi, na fronteira entre a República da Zâmbia e a República do Zimbábue. Deslocamentos foram observados desde os primeiros anos de operação da barragem. As principais conseqüências do comportamento expansivo da barragem foram: deslocamentos verticais da crista, acusados pelos medidores de deformação localizados no corpo da barragem, combinados com ligeira retração em cada direção de compressão. A expansão vertical da crista corresponde a uma deformação da ordem de 10 a $15 \cdot 10^{-6}$ /ano.

Silveira (1999) diz que a complementação da instrumentação de Kariba constou de medidores elétricos de junta, termômetros, pêndulos diretos e marcos de deslocamento superficial. Como Kariba foi uma barragem previamente instrumentada com deformímetros, foi possível verificar que, para tensões de confinamento maiores que 3,0 a 4,0 MPa, as expansões desaparecem (GOGUEL, 1992 apud SILVEIRA, 1999).

3.3.1.5 *França*

- *Chambon*

Um caso notório de RAA na França, descrito pelos autores Saouma e Xi (2004) e Pappalardo Junior (1998) é a barragem de gravidade Chambon, umas das maiores que apresentam a reação. Esta barragem foi construída na década de 30. Deslocamentos irreversíveis ocorreram, cerca de 25 anos depois, a uma taxa de 5 mm/ano para movimentações horizontais de montante e de 3,6 mm/ano para movimento de elevação da crista. É estimado que a RAA cause uma taxa de expansão no concreto de 10 a $80 \cdot 10^{-6}$ /ano.

As medidas para conter a reação incluíram injeção nas fissuras, aplicação de geomembrana e corte para reduzir a tensão de compressão longitudinal, estimada em 5 MPa.

3.3.1.6 Espanha

Os autores Hoyo e Gutierrez (1994) fornecem informações de barragens espanholas afetadas pela RAA.

- *Salas*

O término da construção da barragem de Salas foi em 1972 e, em 1975 foram detectadas as primeiras manifestações da reação álcali-agregado na forma de fissuras nos contrafortes e blocos de gravidade da barragem. Algumas medidas foram adotadas no final dos anos 80 para mitigar as expansões do concreto, como a impermeabilização das faces fissuradas da estrutura, por meio da aplicação de uma placa fabricada no local; injeção nas fissuras e selagem das juntas entre blocos.

A análise do desempenho destas medidas, em 1992, pôde ser feita por meio da instrumentação instalada desde a construção e pela instrumentação adicional feita na década de 80, após o diagnóstico da RAA. Os dados instrumentais indicaram uma tendência na redução dos movimentos verticais; os extensômetros indicaram que a expansão dos blocos reduziu após a impermeabilização. E o movimento de abertura das fissuras foi mínimo.

- *Belesar*

A construção da barragem de Belesar foi concluída em 1963. A observação das leituras do pêndulo indicou que a barragem sofreu deslocamentos irreversíveis para montante, iniciados aproximadamente entre os anos 1981 e 1983. O medidor de junta detectou anomalias concordantes com os deslocamentos irreversíveis. Os extensômetros, localizados em várias partes da estrutura, indicaram taxas de expansão do concreto variando de 5 a $25 \cdot 10^{-6}$ /ano.

Após a análise das movimentações, realizada em 1992, foi iniciada a ampliação do sistema de monitoramento dos movimentos, acrescidos da utilização de nivelamentos de elevada precisão e da medida sistemática do pH da chuva e da água do reservatório. Além da verificação da estrutura por meio do uso de um modelo tridimensional em elementos finitos,

no qual os efeitos da reação álcali-agregado são incluídos na forma de cargas adicionais nas diferentes zonas da barragem.

3.3.2 Casos brasileiros

- *Peti*

A primeira barragem brasileira onde se descobriu a reação álcali-agregado foi Peti, e a segunda, Moxotó (BERNARDES, 2000; SILVEIRA, 1997).

A Usina Hidrelétrica em arco-gravidade de Peti, de propriedade da CEMIG, foi concluída em 1945, no município de São Gonçalo do Rio Abaixo - MG. Os primeiros relatos de aparecimento de fissuras na barragem são de 1964. Os principais sintomas identificados foram fissuras tipo “mapa” e alteamento da crista da barragem. O planejamento da instrumentação complementar se atentou à instalação de extensômetros múltiplos em furos de sondagem, medidores triortogonais de juntas e marcos superficiais. Para a minimização dos efeitos da RAA, algumas estruturas foram recuperadas por: substituição do concreto superficial danificado com tratamento de fissuras, impermeabilizações nas faces e injeção de calda de argamassa (MAGALHÃES et al., 2000; MAGALHÃES; MOURA, 1997).

- *Complexo Paulo Afonso*

As usinas hidrelétricas do complexo Paulo Afonso, pertencentes à CHESF, localizadas no estado da Bahia, também apresentaram anomalias e problemas mecânicos e estruturais decorrentes da RAA. As usinas componentes deste complexo são: Paulo Afonso I (PA I), Paulo Afonso II (PA II), Paulo Afonso III (PA III), Paulo Afonso IV (PA IV) e Apolônio Sales (Moxotó).

Após a observação do fenômeno nas usinas, uma instrumentação complementar foi instalada e modelagens matemáticas foram elaboradas, a fim de observar a evolução da expansão e prever os problemas que poderiam advir da contínua movimentação da estrutura. Os instrumentos instalados consistiram, basicamente, de extensômetros múltiplos de haste para medir deformação, pêndulos para acompanhamento de deslocamentos horizontais, marcos superficiais para acompanhar o deslocamento absoluto da estrutura, medidores triortogonais e termômetros para medir a temperatura do concreto, interna e superficialmente.

Os extensômetros múltiplos instalados nas usinas PA I, II e II apresentaram taxa de expansão do concreto da ordem de 40 a $50 \cdot 10^{-6}$ /ano e $35 \cdot 10^{-6}$ /ano na usina PA IV.

Estudos detalhados sobre a investigação da RAA nestas usinas podem ser verificados nos trabalhos de Silveira, Degaspere e Cavalcanti (2000), Cavalcanti, Silveira e Degaspere (2000) e Silva (2008).

- *Traição*

A conclusão das obras da usina elevatória de Traição, localizada na cidade de São Paulo, aconteceu em 1940 e integra o Sistema Hidráulico da ELETROPAULO. Problemas mecânicos como desalinhamentos sucessivos do eixo principal da unidade 1 apareceram nos primeiros anos de operação, seguidos da ocorrência de fissuras e vazamentos no concreto (GUERRA et al., 1997).

Nesta usina, foram instalados pinos para leitura com paquímetro, com o objetivo de monitorar o fissuramento, e marcos de referência para observar o deslocamento vertical. Para complementar as observações, foram instaladas pinos e medidores triortogonais para monitorar as fissuras, extensômetros múltiplos para o monitoramento vertical e piezômetros de fundação (GUERRA et al., 1997). Em 2000, foram instalados extensômetros múltiplos na direção horizontal (PIASENTIN et al., 2006).

De acordo com Piasentin et al. (2006), os resultados das taxas de deformações do concreto, com base nas leituras dos marcos de nivelamento e dos extensômetros verticais, demonstrou decréscimo e uma tendência de estabilização nos últimos anos. Em 1982, o concreto apresentava taxa de expansão de $47 \cdot 10^{-6}$ /ano, nos últimos 10 anos os valores foram inferiores a $15 \cdot 10^{-6}$ /ano. Os outros equipamentos não apresentam movimentações significativas.

Entre 2004 e 2005 foram realizados trabalhos de recuperação, por meio de tratamentos de fissuras e impermeabilizações (PIASENTIN et al., 2006).

- *Sistema Cantareira*

A primeira etapa do Sistema Cantareira, pertencente à SABESP, entrou em funcionamento em 1974 e no ano de 1989 foram observadas as ocorrências de inúmeras fissuras na estrutura da tomada d'água do túnel 6, que veio a ser diagnosticada como causa de reação álcali-

agregado. Sendo assim, um sistema de monitoramento da tomada d'água composto de instrumentação e inspeções visuais periódicas foi desenvolvido.

A instrumentação da estrutura consistiu da instalação de pinos para medição da abertura de fissuras; bases de alongômetros; medidores triortogonais e medição de temperatura com pirômetro de infravermelho. Para a medição da folga da comporta segmento, foi instalado um medidor triortogonal de juntas acoplado a uma barra de aço fixada no vão onde ocorre a movimentação da comporta. As taxas de abertura das fissuras monitoradas variaram de 0 a 0,68 mm/ano (KUPERMAN et al., 2006).

- *Billings-Pedras*

Informações detalhadas da descoberta da RAA e do primeiro ano de observação dos instrumentos instalados na barragem reguladora de Billings-Pedras estão em Guerra et al. (1997).

A barragem reguladora Billings-Pedras, localizada em São Paulo, teve sua construção concluída em 1936. Em 1992, uma empresa de consultoria foi contratada para a elaboração de estudos para a possível motorização da barragem. Durante estes estudos foram observadas anomalias típicas de reação álcali-agregado.

A suspeita da existência de reatividade álcali-agregado nas estruturas de concreto de Billings-Pedras exigiu um plano de investigações mineralógicas e petrográficas e caracterização das propriedades mecânicas do concreto. Tão logo confirmado o diagnóstico de RAA, foi realizado um projeto de instrumentação complementar nas seções da barragem. Entre 1995 e 1996, foram instalados extensômetros múltiplos de hastes, bases para a medição de convergência, marcos superficiais, medidores triortogonais, piezômetros e termômetros para a observação da temperatura do ar e da água do reservatório. Nesta fase, também foram realizados estudos em modelos matemáticos, simulando taxas de expansão do concreto de 10 a $20 \cdot 10^{-6}$ /ano, estimadas baseando-se nas evidências macro-estruturais dos sintomas da RAA.

Após mais de um ano de observação dos instrumentos instalados, os extensômetros múltiplos apresentaram taxa de expansão média de $20 \cdot 10^{-6}$ /ano. Guerra et al. (1997) afirma que dentre os instrumentos instalados, os extensômetros múltiplos permitem a melhor avaliação da taxa de expansão do concreto.

- *Furnas*

A usina hidrelétrica de Furnas foi construída entre os anos de 1958 e 1963, no Estado de Minas Gerais.

Inspeções realizadas nas estruturas de concreto da UHE Furnas foram realizadas, em 1996, para avaliar os efeitos provocados pela RAA. As observações visuais registraram um quadro de intensa fissuração tipo “mapa” em várias estruturas, fissuras entre camadas de concretagem, deslocamentos do concreto e exsudações de gel. Marcos superficiais e medidores triortogonais foram instalados no final do período construtivo. Os resultados fornecidos pelos marcos demonstraram uma taxa de expansão do concreto de $13 \cdot 10^{-6}$ /ano e os medidores triortogonais instalados nas juntas de contração entre blocos acusaram deslocamentos irreversíveis (GALLETTI et al., 1997).

4 ESTUDO DE CASO: UHE JAGUARI - CESP

4.1 HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS

A UHE Jaguari está localizada no Rio Jaguari com a margem direita pertencente ao município de Jacareí e a margem esquerda a São José dos Campos, Estado de São Paulo. A última máquina foi instalada em 1973. A geração de energia da usina é realizada por duas turbinas tipo Francis com potência instalada de 27,6 MW. O reservatório possui 56 km² de extensão e sua principal finalidade é a regularização da vazão do Rio Paraíba do Sul, que é utilizado para o abastecimento de água de cidades do Vale do Paraíba, no Estado de São Paulo e de cidades do Estado do Rio de Janeiro (COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP, 2008). A tomada d'água da usina é uma estrutura do tipo torre de 63 m de altura com contrafortes. A água chega à casa de força através de um túnel adutor com queda de referência de 49,9 m.

Fotos das estruturas da usina podem ser verificadas nas Figuras 13 a 16, que, respectivamente, mostram a vista aérea da UHE Jaguari com a localização das suas estruturas e as vistas aproximadas da barragem de terra, do vertedouro de superfície e da casa de força. A Figura 17 traz a imagem da tomada d'água na época da construção e a Figura 18 ilustra a mesma em 2009. Para melhor visualização das localizações dos componentes, a Figura 19 traz projetos da vista frontal e cortes longitudinais e a Figura 20 ilustra a vista em planta e um corte passando abaixo da plataforma (laje). A ficha técnica resumida da usina está apresentada no Quadro 1.

As primeiras observações de fissuras e infiltrações nas estruturas da UHE Jaguari aconteceram na década de 80. Em 1985 foi realizada uma manutenção geral na usina, quando foram constatadas inúmeras infiltrações nas paredes internas da tomada d'água, em alguns pontos a vazão estimada foi de 100 litros por minuto (COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP, 1985). No ano de 1990 leituristas da usina foram informados, por um morador do local, que as paredes externas da tomada d'água apresentavam fissuras. Inspeções realizadas quando o nível do reservatório estava baixo confirmaram as ocorrências de fissuras

horizontais nas juntas de concretagem (COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP, 1990).

No ano 2000, a CESP contratou uma equipe de consultoria para realizar a inspeção e a reavaliação dos valores da instrumentação de auscultação de algumas de suas barragens de concreto, terra e enrocamento, entre elas a UHE Jaguari. Na ocasião, foram detectadas fissurações de características aleatórias nas estruturas de concreto da usina, movimentação de juntas de dilatação, infiltrações e fissuras longitudinais nos pilares do pórtico de carga da tomada d'água, entre outros.

A recomendação da equipe de consultoria foi a realização de estudos de laboratório, por meio de análises petrográficas em testemunhos extraídos da usina, para indicar se a gênese das deteriorações é a reação álcali-agregado. Além disso, foi sugerida a elaboração de um projeto de instrumentação para auscultar o comportamento das estruturas, medindo a evolução dos movimentos de fissuras, deslocamentos diferenciais entre blocos e distorções.

Informações detalhadas dos trabalhos de inspeção e avaliação preliminar do comportamento das estruturas de concreto da UHE Jaguari, realizados pela equipe de consultores, estão em THEMAG (2000).

A petrografia no concreto foi realizada, confirmando a presença de RAA.

A CESP sempre se mostrou atenta quanto à ocorrência da RAA na construção dos seus empreendimentos desde a década de 60, quando estudos aprofundados da reação e de métodos de mitigação, com consultorias internacionais, foram realizados para a construção da usina de Jupia, se estendendo à Ilha Solteira e obras posteriores. Acredita-se que tenha desenvolvido a reação na UHE Jaguari devido à falha de métodos de investigação da potencialidade reativa de agregados. Marques (2009) mostra que os resultados de diversos métodos de ensaios de reatividade realizados nos agregados retirados do enrocamento da barragem e de uma pedreira comercial da região, possivelmente com as mesmas características dos utilizados na confecção dos concretos da usina, indicaram que estes não têm potencialidade reativa. A autora constata que o tipo litológico do agregado tem influência direta na detecção da reatividade pelos métodos de ensaios.



Figura 13: UHE Jaguari
Fonte: Companhia Energética de São Paulo – CESP (2008)



(a) Montante



(b) Jusante

Figura 14: Barragem de terra



Figura 15: Vertedouro de superfície



Figura 16: Casa de força



Figura 17: Tomada d'água em construção. Vista frontal



Figura 18: Tomada d'água em 2009

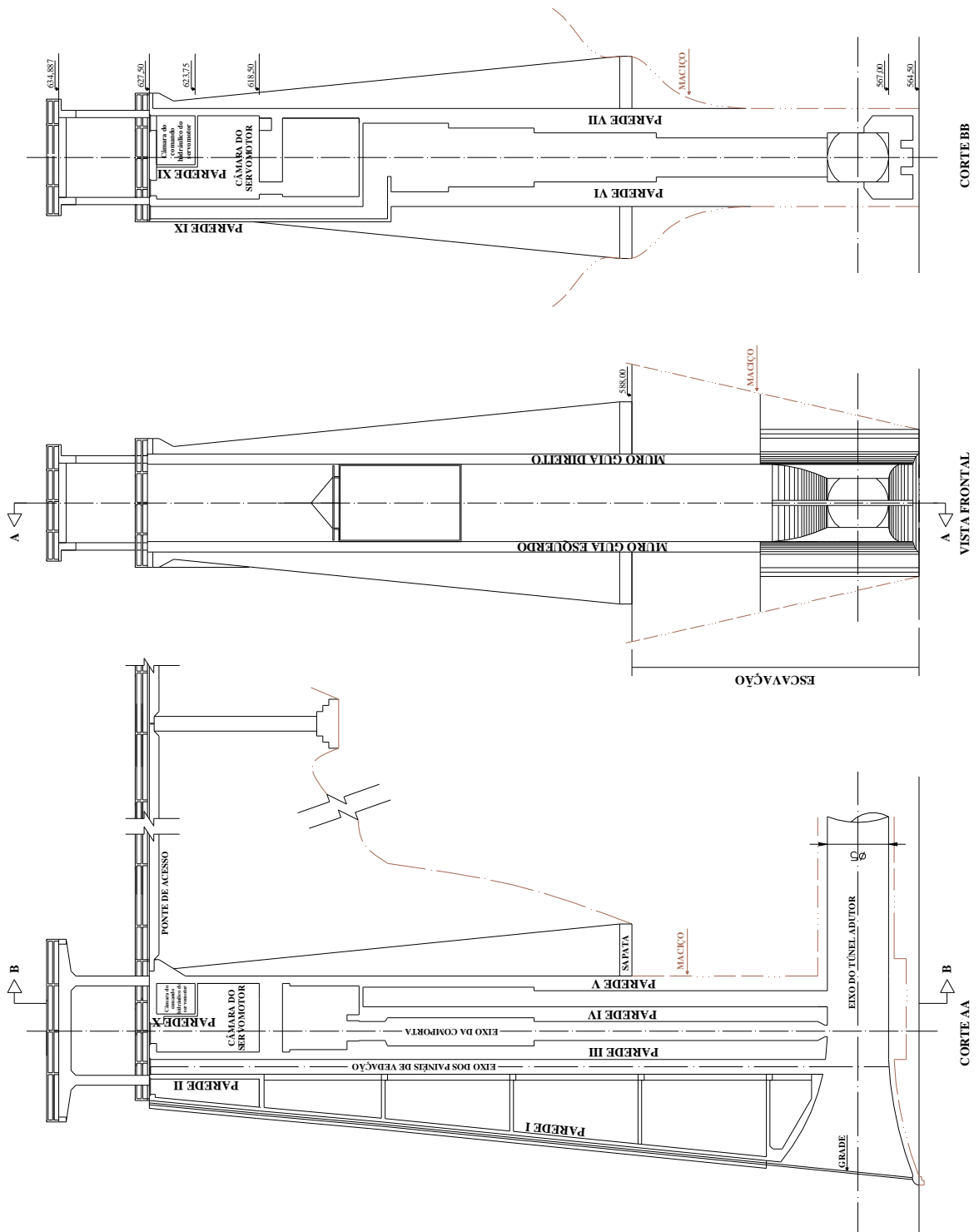


Figura 19: Vista frontal e cortes
Fonte: Adaptado dos desenhos JA-TA 7 e JA-TA 37, (HIDROSERVICE, 196-)

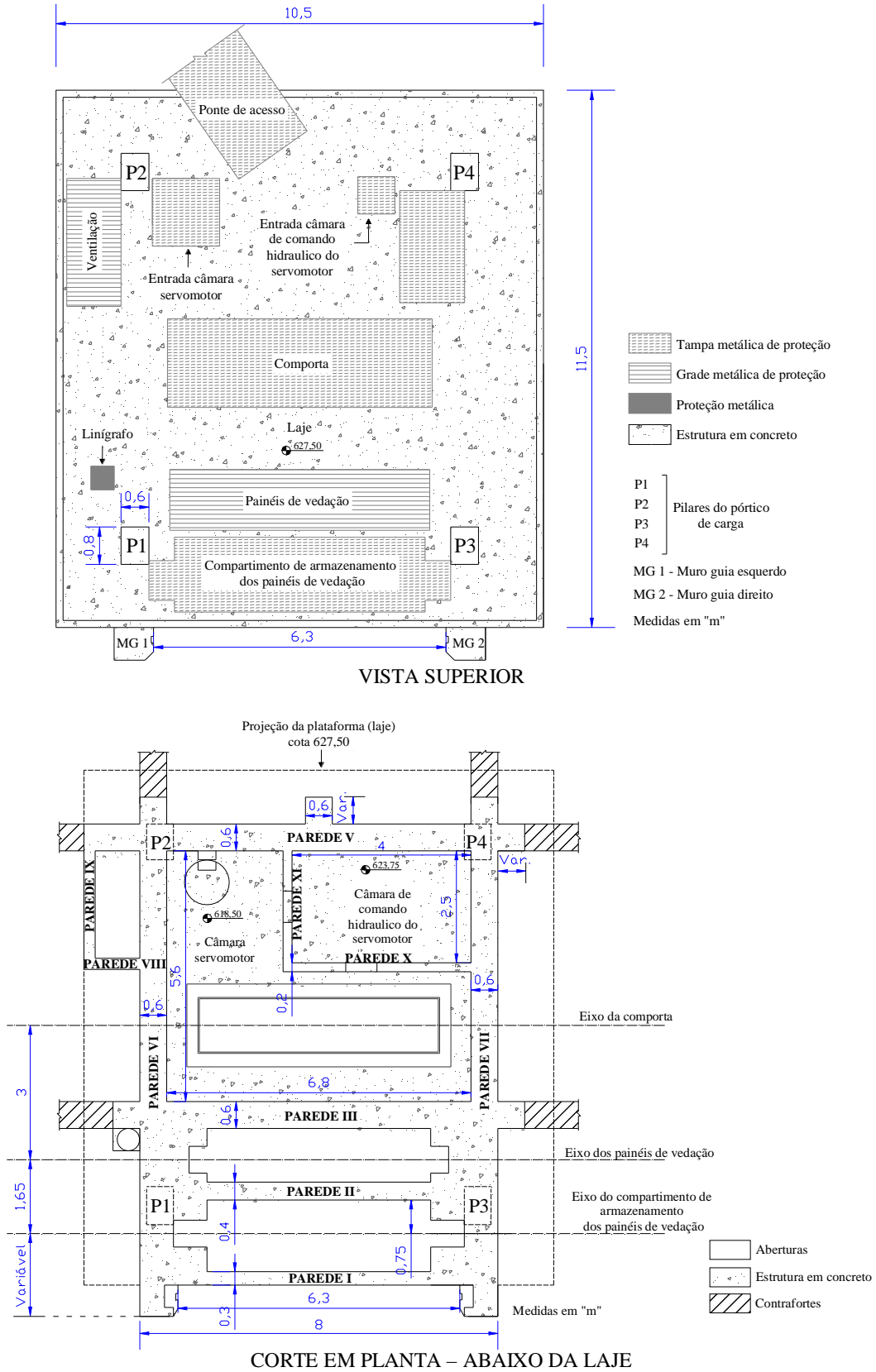


Figura 20: Vista superior e corte em planta
Fonte: Adaptado do desenho JA-TA 17 (HIDROSERVICE, 196-)

Quadro 1: Ficha técnica da UHE Jaguari

Condições de montante	
Área da bacia hidrográfica	1.300 km ²
Área do espelho d'água (N.A. 623,00 m)	56 km ²
Volume morto	443 x 10 ⁶ m ³
Volume útil	793 x 10 ⁶ m ³
Barragem de terra	
Comprimento no coroamento	623,00 m
Níveis característicos de montante	
N.A. máximo maximorum	625,80 m
N.A. máximo útil	623,00 m
N.A. mínimo útil	603,20 m
Vazão média a longo termo (MLT 1931 - 2005)	28 m ³ /s
Condições de jusante	
N.A. máximo maximorum	562,40 m
N.A. máximo	557,90 m
N.A. mínimo	555,80 m
Vazão máxima dos vertedores (vertedores + válvulas)	410 m ³ /s
Unidades geradoras - turbinas	
Tipo	Francis eixo vertical
Turbinas	2
Potência nominal unitária	12.364 kW
Queda de referência	49,90 m
Engolimento máximo	25 m ³ /s
Unidades geradoras - geradores	
Tipo	síncrono
Potência nominal efetiva	12.000 kW
Potência nominal total instalada	27.600 kW
Órgãos de descarga	
Vertedouro de superfície	livre
Dimensões do vão	43,00 x 2,50 m
Cota da soleira	623,00 m

Fonte: Companhia Energética de São Paulo - CESP (2008)

4.2 MONITORAMENTO NA TOMADA D'ÁGUA – 1ª ETAPA

Na estrutura de concreto da tomada d'água da UHE Jaguari está instalada uma instrumentação em algumas fissuras desde o início do ano 2000, quando foi levantada a possibilidade de ocorrência de reação álcali-agregado na usina. A instrumentação consta de três medidores triortogonais, instalados na cota 627,50 m, referente à laje, em fissuras localizadas aparentemente de forma simétrica, contornado os pilares do pórtico de carga. A Figura 21 mostra fotos dos MT instalados nestas fissuras e a Figura 22 esquematiza um croqui da laje da tomada d'água com a localização e posicionamento dos medidores triortogonais. Os tipos de movimentos registrados pelos MT, tendo por base os eixos de referência da Figura 22, estão no Quadro 2.

A análise dos resultados das movimentações das fissuras indica que há tendência crescente e contínua de movimentação nas três direções ortogonais. Os deslocamentos mais acentuados ficam por conta do movimento de abertura. Este apresenta comportamento linear e crescente, sem disposição de estabilização no atual estágio da observação, o que pode sugerir que o processo expansivo que age no concreto, ocasionado pelo produto da reação, está em pleno desenvolvimento (ZOILO et al., 2008).

A Tabela 1 traz uma síntese das taxas de deslocamentos das fissuras monitoradas pelos MT-1, MT-2 e MT-3 e as Figuras 23, 24 e 25 ilustram os gráficos de movimento para os mesmos MT, respectivamente.

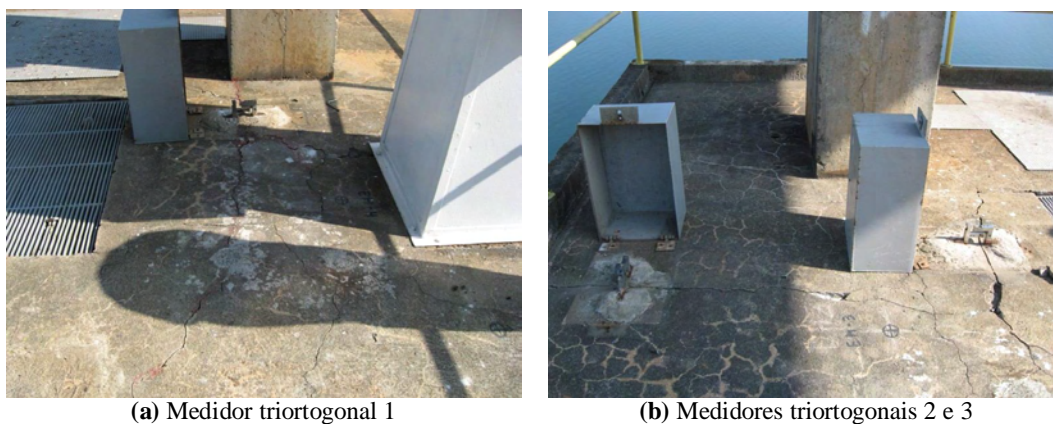


Figura 21: Medidores triortogonais instalados na laje da tomada d'água

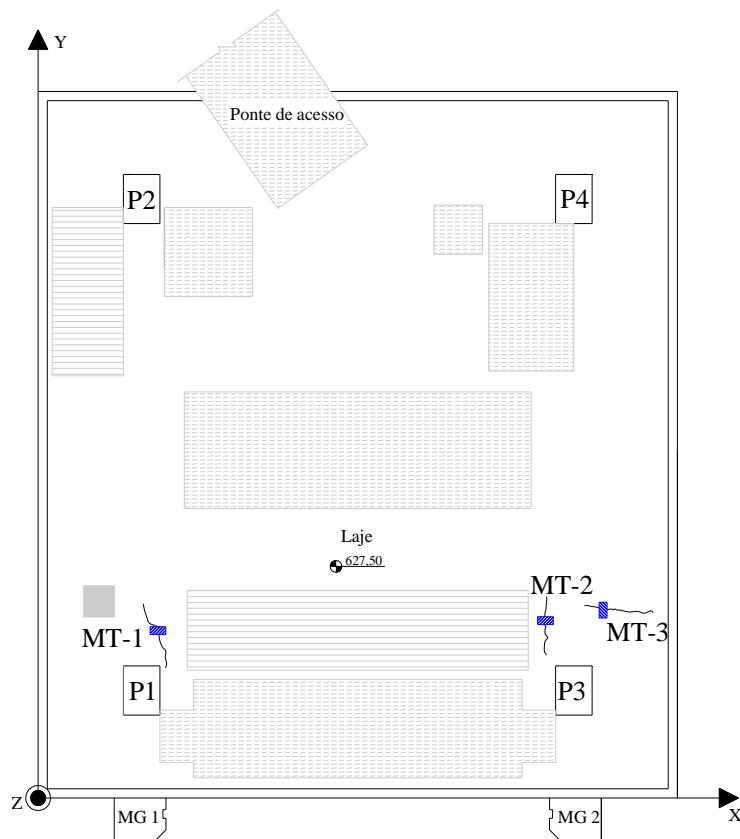


Figura 22: Localização e posicionamento dos MT na laje da tomada d'água

Quadro 2: Movimento medido pelos medidores triortogonais em cada eixo de referência

	X	Y	Z
MT - 1	A/F	A/R	R/E
MT - 2	A/F	A/R	R/E
MT - 3	A/R	A/F	R/E

Fonte: Adaptado de Marques (2009)

Sendo: A/F – Abertura/fechamento

A/R – Avanço/Recuo

R/E – Recalque/Elevação

Tabela 1: Taxas de deslocamentos das fissuras nas três direções ortogonais medidas pelos MT

FISSURAS	TAXA DE DESLOCAMENTO (mm/ano)		
	A/F	A/R	R/E
MT – 1	0,35	0,12	0,04
MT – 2	0,20	-0,05*	-0,13**
MT – 3	0,38	-0,01*	0,11

*Os valores negativos para A/R indicam recuo medido pelo instrumento

**Os valores negativos de R/E indicam recalque medido pelo instrumento

Fonte: Zoilo et al. (2008)

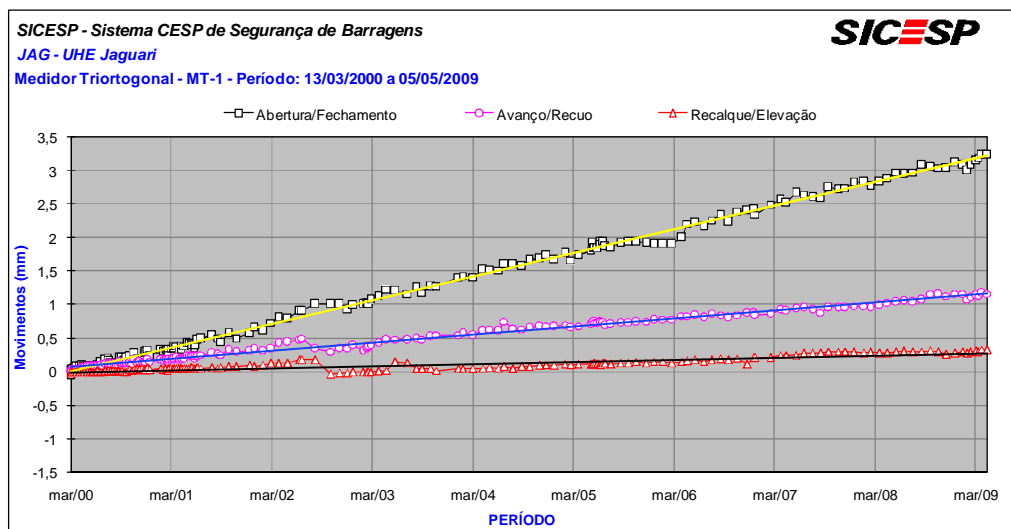


Figura 23: Deslocamentos do medidor triortogonal 1

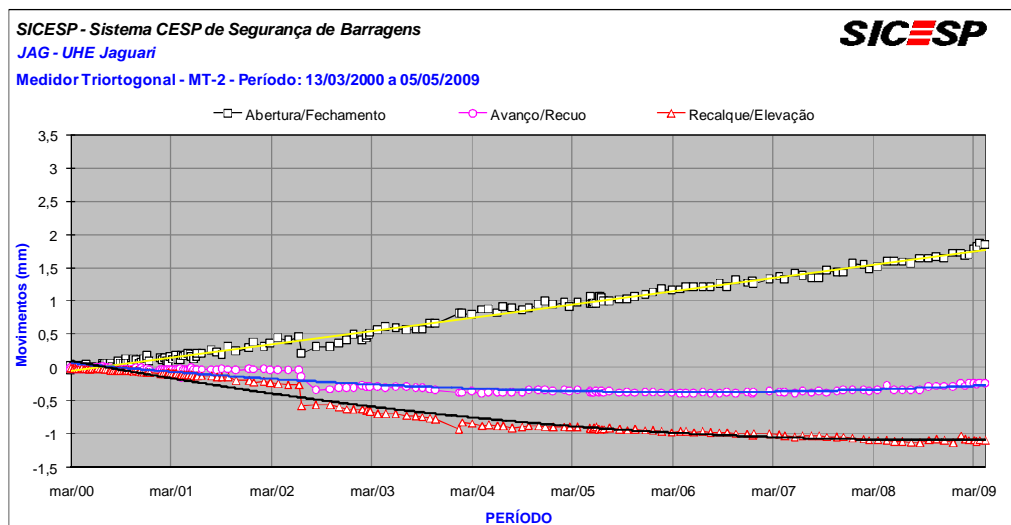


Figura 24: Deslocamentos do medidor triortogonal 2

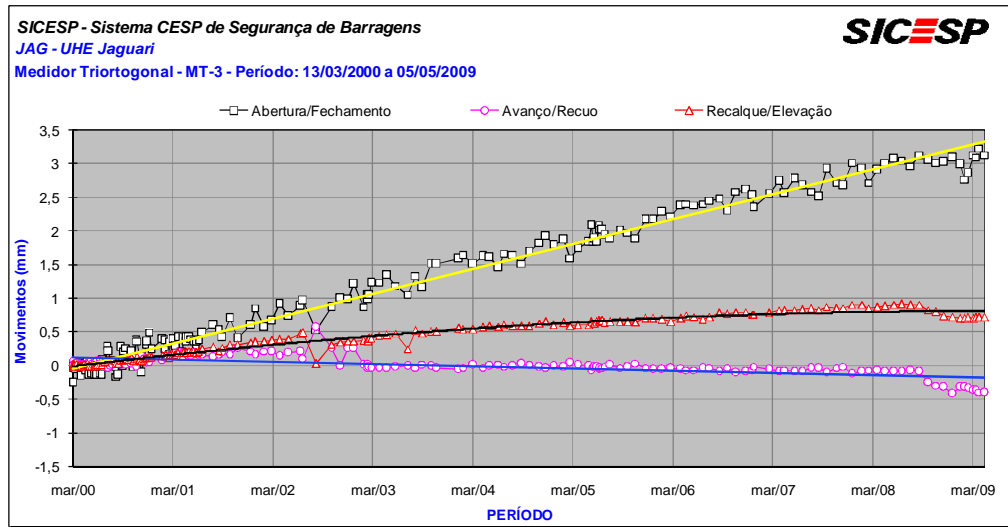


Figura 25: Deslocamentos do medidor triortogonal 3

4.3 SISTEMA CESP DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (SICESP)

O SICESP é um programa computacional que possui um banco de informações dos empreendimentos da CESP. Nele é possível programar as formulações dos parâmetros analisados nas estruturas e obter automaticamente as planilhas e gráficos de monitoramento e as características técnicas das barragens. Todos os equipamentos instalados nas usinas da CESP são cadastrados no SICESP. Os dados fornecidos pelo programa são automaticamente atualizados quando se inserem as leituras dos equipamentos. O acesso aos dados do SICESP é possível por meio de computadores interligados à rede interna da CESP, onde esteja instalado um atalho para o programa.

5 MONITORAMENTO NA TOMADA D'ÁGUA DA UHE JAGUARI – 2ª ETAPA

Há um consenso no meio técnico a respeito das principais manifestações e movimentações observadas em estruturas afetadas pelo processo expansivo causado pela RAA. A intensidade dos movimentos observados e a sua importância para a segurança operacional e estrutural do empreendimento dependem de uma série de fatores, entre eles as propriedades e geometria do projeto, características de implantação e condições de operacionalidade.

Os efeitos da RAA na tomada d'água da UHE Jaguari poderão ocasionar problemas na funcionalidade da usina hidrelétrica. Pela sua configuração estrutural, sendo uma estrutura do tipo torre com contrafortes, dividida internamente entre paredes e lajes e com muros externos, as expansões poderão ocasionar deslocamentos diferenciais nestas paredes e muros, travando a movimentação das peças integradas à geração da usina, pois duas paredes suportam as guias metálicas por onde se movimentam as peças da comporta ensecadeira e da comporta central e no muro estão as guias metálicas da grade de contenção de objetos.

Após uma análise preliminar, ficou clara a necessidade de monitoramento dos movimentos relativos de paredes e muros, de parâmetros que indiquem a potencial taxa de expansão desenvolvida pelo concreto e a evolução do fenômeno e das anomalias surgidas em sua decorrência. Tendo por base as observações dos efeitos expansivos e das principais manifestações da RAA e considerando os aspectos necessários para o acompanhamento do comportamento de estruturas afetadas pela patologia, os principais parâmetros de monitoramento que ficaram em evidência foram:

- Deslocamentos das fissuras nas três direções ortogonais;
- Deslocamentos horizontais relativos entre a laje da tomada d'água e um ponto da fundação, em duas direções ortogonais;
- Deslocamentos horizontais absolutos, medidos na laje da tomada d'água;
- Deslocamentos verticais relativos entre a laje da tomada d'água e um ponto da fundação e entre camadas da estrutura com expansibilidade diferenciada;
- Caracterização das taxas de expansão verticais do concreto;
- Deslocamentos verticais absolutos, medidos na laje da tomada d'água;

- Deslocamentos relativos entre os muros guia da grade e
- Deslocamentos relativos entre as paredes do compartimento de armazenamento dos painéis da comporta ensecadeira (stop-log).

A escolha das técnicas de monitoramento deve levar em consideração, além das condições de implantação no local, a ordem de grandeza que se espera para as medições. Com as informações dos principais parâmetros de observação e considerando deslocamentos oriundos da RAA, com ordem de grandeza de 0,01 mm, no mínimo, foi possível determinar as características desejáveis e as técnicas utilizadas para o monitoramento, viabilizando o emprego de instrumentos e técnicas geodésicas de medição para as observações estruturais.

Este capítulo mostra as principais deteriorações superficiais encontradas na tomada d'água, observadas nas inspeções visuais realizadas no local, e trata dos resultados do projeto de monitoramento adicional desenvolvido, demonstrando necessidades, justificativas, alternativas encontradas e detalhamento do sistema implementado.

5.1 INSPEÇÕES VISUAIS

As inspeções visuais realizadas na tomada d'água da UHE Jaguari em 2008 e 2009, durante o projeto P&D, revelaram um quadro específico de deterioração causado pela RAA. As principais deteriorações superficiais encontradas foram:

- Fissurações aleatórias, com característica de “mapa”, na laje;
- Fissurações aleatórias nas paredes internas e externas;
- Fissuras orientadas e com exposição de armadura na laje;
- Fissurações orientadas nos pilares, predominantemente na direção vertical;
- Fissurações nos muros guia da grade;
- Exsudação de gel das fissuras da laje;
- Pontos de descoloração no concreto;
- Deslocamentos diferenciais nas juntas da guia da grade e
- Testemunhos extraídos da estrutura com poros preenchidos com gel de reação.

As Figuras 26 a 35 ilustram as deteriorações citadas.



(a) Fissuras aleatórias



(b) Fissuras orientadas com aleatórias ao redor

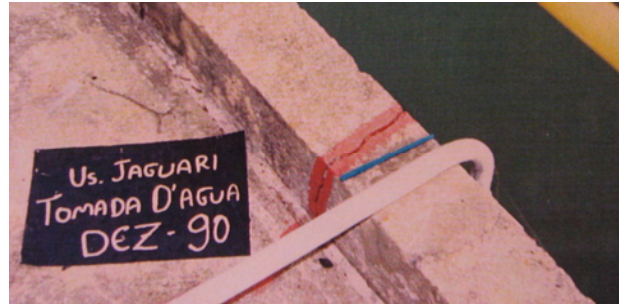
Figura 26: Fissurações na laje



Figura 27: Fissurações aleatórias nas paredes externas e contrafortes

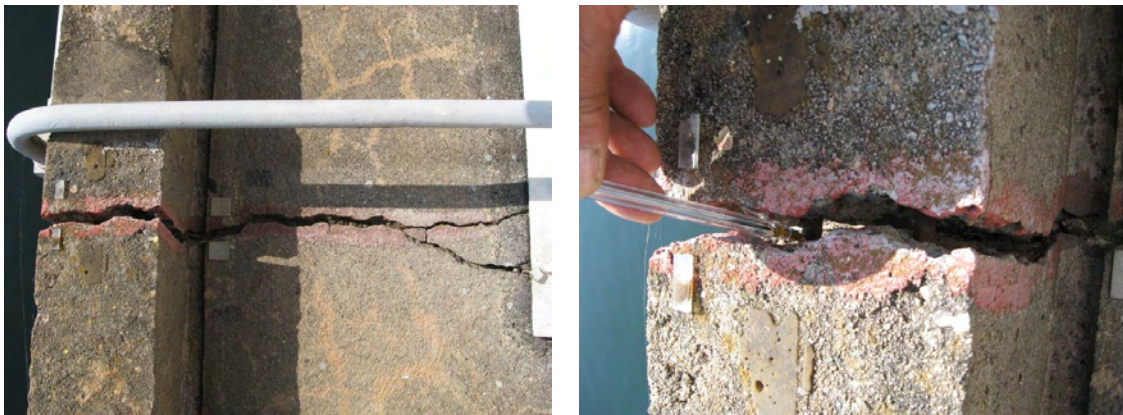


Figura 28: Fissurações aleatórias nas paredes internas da câmara do servomotor



(a) Fissura em 1990

Fonte: Companhia Energética de São Paulo – CESP (1990)



(b) Fissura em 2009

Figura 29: Fissura orientada com exposição de armadura na laje da tomada d'água



Figura 30: Fissuras verticais nos pilares

As fissurações são responsáveis pela perda de estanqueidade do concreto e pela exposição das armaduras à ação da umidade. A fissura da Figura 29 possui abertura da ordem de 10 mm, onde há a exposição da armadura, que já se apresenta com bitola reduzida devido à oxidação da barra, escamação e, conseqüentemente, perda de seção. Usualmente há o rompimento da

armadura devido às forças de tração induzidas pela abertura das fissuras, mas, neste caso, percebe-se que houve perda de aderência desta com o concreto.



Figura 31: Fissurações nas paredes internas do compartimento do stop-log



(a) Vista superior (muro guia esquerdo)



(b) Vista lateral direita (muro guia esquerdo)



(c) Vista lateral esquerda (muro guia esquerdo)



(d) Vista lateral direita (muro guia direito)

Figura 32: Fissurações e descoloração no concreto dos muros guia da grade



Figura 33: Exsudação de material branco de fissuras



Figura 34: Deslocamento diferencial da guia metálica da grade (muro guia esquerdo)



Figura 35: Poros do concreto preenchidos com material de reação

As deteriorações evidenciadas nas Figuras 31, 32 e 34 confirmam o risco de travamento na movimentação dos painéis de vedação da comporta ensecadeira e da grade.

Como uma tentativa de verificar a evolução das deteriorações em áreas predeterminadas, foi realizado um mapeamento das fissuras, em agosto de 2008, pela técnica do registro em filme plástico com canetas a tinta, em dois locais da tomada d'água. O mapeamento consistiu na fixação de um plástico em local previamente determinado, com área de aproximadamente 1 m², onde foram desenhadas as fissuras do concreto, localizadas sob o plástico, com caneta colorida. Em tempo oportuno, o plástico será novamente fixado no mesmo local e, com caneta de cor diferente, serão desenhadas as modificações ocorridas naquela área, a partir do primeiro mapa. Dessa forma, será possível verificar o surgimento de novas fissuras e o aumento daquelas já existentes.

Uma nova fixação do mapeamento para o monitoramento foi realizada em agosto de 2009 e não foi possível detectar alterações.

Os locais contemplados com os mapeamentos, um na laje próxima ao pilar 3 e outro no pilar 3, são mostrados nas Figuras 36 e 37.



Figura 36: Mapeamento de fissuras na laje



Figura 37: Mapeamento de fissuras no pilar

5.2 TÉCNICAS GEODÉSICAS DE MONITORAMENTO

5.2.1 Monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais absolutos

5.2.1.1 Concepção

As técnicas determinadas para o monitoramento dos deslocamentos horizontais e verticais absolutos foram, respectivamente, o método das colimações e o nivelamento geométrico de precisão. A escolha foi motivada pela obtenção de mais parâmetros de observação da tomada d'água e pela facilidade de adquirir as leituras, visto que estes métodos já são empregados para o monitoramento dos deslocamentos da barragem de terra e diques, na área do reservatório da usina.

Para o emprego das técnicas no monitoramento da tomada d'água foi necessário implantar quatro marcos superficiais (MS) na laje, próximos aos pilares, no final do mês de setembro de 2008, cujas denominações foram: MS 323, MS 324, MS 325 e MS 326, próximos aos pilares P2, P4, P3 e P1. Estes marcos são placas metálicas trapezoidais instaladas na laje para a centragem da mira de invar (medição vertical) e da baliza (medição horizontal). A Figura 38 ilustra o marco superficial instalado na tomada d'água. As grandezas medidas pelas técnicas geodésicas são dadas em termos absolutos, ou seja, são compostas dos deslocamentos provenientes da estrutura e do maciço onde esta se apóia.



Figura 38: Marco superficial trapezoidal

5.2.1.2 Método das colimações

Os deslocamentos horizontais absolutos são monitorados pelo método das colimações, que consiste em obter ângulos horizontais pelas visadas aos marcos superficiais instalados na tomada d'água e à baliza, locada em um marco básico (MB) na margem esquerda da barragem. O aparelho de leituras, um teodolito WILD T3 com sensibilidade de 0,2", fica centrado em um marco básico localizado na margem direita da barragem. As Figuras 39 e 40 ilustram o aparelho de leitura utilizado e a baliza centrada no MS da laje da tomada d'água, respectivamente. A Figura 41 traz parte de um desenho UHE Jaguari, demonstrando a região da tomada d'água em planta com a localização dos pilares e do marco básico da margem esquerda.

A primeira leitura angular foi realizada quando se instalaram os MS na laje da tomada d'água. As leituras posteriores a esta fornecem as diferenças angulares, que, por meio de tratamento matemático se transformam em deslocamentos horizontais, sentido montante/jusante.



Figura 39: Teodolito WILD T3



Figura 40: Baliza centrada em MS na laje da tomada d'água

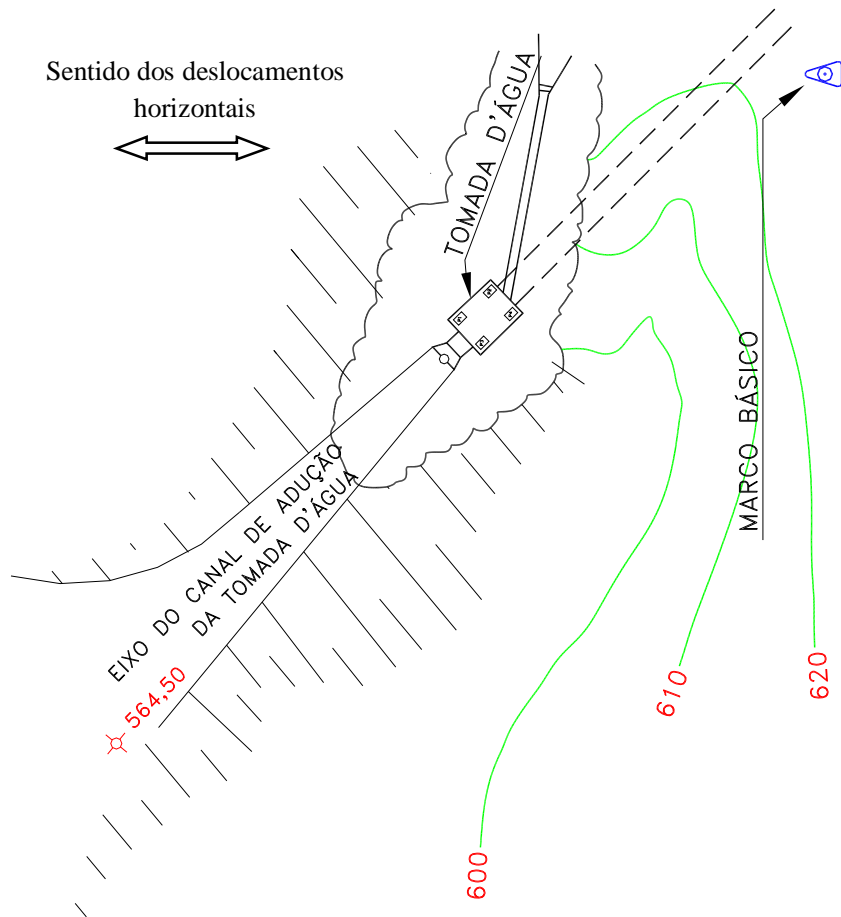


Figura 41: Localização em planta da tomada d'água e do marco básico da margem esquerda
Fonte: Adaptado do desenho 009 (COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP, 2005)

5.2.1.3 Nivelamento geométrico de precisão

Para o controle dos movimentos verticais da tomada d'água, realizado pelo método do nivelamento geométrico, é utilizado um nível WILD N3 e mira graduada de invar, com resolução de 0,01 mm.

Foi instalado um marco de referência, em rocha, próximo à ponte de acesso da tomada d'água, como verificado na Figura 42. A partir desta referência, considerada indeslocável, são realizadas as medições de nivelamento por visadas ré e vante em todos os marcos da tomada d'água.

As Figuras 43 e 44 ilustram o nível e a visão aproximada da mira de invar centrada no marco, respectivamente. A mira de invar centrada no marco de referência e no marco da tomada d'água pode ser visualizada nas Figuras 45 e 46, respectivamente. As fotos mostradas

nas Figuras 38 a 46 foram tiradas pela equipe de topografia da CESP, quando da realização da primeira leitura na tomada d'água.



Figura 42: Marco de referência indeslocável



Figura 43: Nível WILD N3



Figura 44: Mira invar graduada



Figura 45: Mira centrada no marco de referência



Figura 46: Mira centrada no MS da tomada d'água

5.3 INSTRUMENTAÇÃO

5.3.1 Monitoramento das movimentações das fissuras

5.3.1.1 Concepção

A inspeção visual da estrutura da tomada d'água revelou grande quantidade de fissuras ocorrendo de forma aleatória, com característica de “mapa” e, em alguns locais, aparecem com configuração orientada. Os três pontos de monitoramento, citados no item 4.2, não permitem uma avaliação conjunta da estrutura, o que limita a obtenção de conclusões de comportamento da mesma. Portanto, ficou caracterizada a necessidade de ampliação do sistema de observação deste tipo de patologia. Esta ampliação permitirá avaliar a evolução dos deslocamentos das fissuras e, conseqüentemente, ajudar na verificação da continuidade das expansões ocasionadas pela RAA e, pela observação de fissuras com deslocamentos maiores, verificar os locais da estrutura com expansibilidade mais acentuada. A exemplo dos comportamentos registrados pela instrumentação preexistente espera-se que os pontos adicionais de observação se apresentem de forma condizente, com deslocamentos crescentes e contínuos, enquanto o concreto se apresentar em franca expansão.

Para realizar o monitoramento das fissuras optou-se pela utilização de medidores triortogonais e bases para a medição dos movimentos de fissuras por serem equipamentos de utilização consagrada para medição de fissuras e juntas de dimensões maiores e menores, respectivamente. Além disso, o LCEC tem fabricação própria destes instrumentos. Todas estas facilidades explicam as escolhas.

Os MT realizam a medição dos deslocamentos das fissuras nas três direções ortogonais de abertura/fechamento (A/F), avanço/recuo (A/R) e recalque/elevação (R/E) e, pelas BT, é possível observar movimentos de abertura/fechamento em fissuras de menores dimensões.

Sendo assim, no período de 30/07 a 02/08/2008 foram instalados 7 MT e 24 pares de BT, nas fissuras espalhadas na laje, nos muros guia da grade, na câmara do servomotor, no pórtico de carga, nos pilares e nas vigas da tomada d'água da UHE Jaguari.

5.3.1.2 Medidores Triortogonais (MT)

A localização dos medidores triortogonais se fundamentou na observação da largura, extensão e continuidade das fissuras. As principais fissuras localizadas nas estruturas da tomada d'água receberam MT para efetuar o monitoramento, com o cuidado de contemplar vários locais. Observando o maior campo de medida do equipamento, os MT foram instalados nas fissuras mais abertas. A instalação foi realizada pela equipe técnica do Laboratório CESP de Engenharia Civil.

Os medidores triortogonais foram instalados com o uso de um gabarito utilizado para a locação dos chumbadores, de modo que estes fiquem aproximadamente equidistantes da fissura. Após a locação, os MT foram chumbados no concreto, com argamassa.

A primeira leitura foi realizada com o aparelho fixo após a cura da argamassa. O relógio comparador que realiza as leituras possui resolução de 0,01 mm e campo de 10 mm.

A Tabela 2 traz uma síntese dos novos medidores triortogonais e respectivos locais de instalação na tomada d'água e faz algumas observações. As fotos dos medidores triortogonais instalados na tomada d'água da UHE Jaguari estão na Figura 47 e o dispositivo que realiza as leituras está ilustrado na Figura 48. As localizações dos MT na estrutura estão em croquis encontrados no item 5.3.1.3.

Todos os MT foram protegidos com caixa metálica para evitar o vandalismo e a degradação por intempéries.

Tabela 2: MT instalados na tomada d'água da UHE Jaguari

DENOMINAÇÃO	LOCAL DE INSTALAÇÃO	OBSERVAÇÕES
MT-8	Viga lateral	Fissura com exposição de armadura
MT-9	Pilar 2 (P2)	
MT-10	Viga lateral	Próximo ao MG 1*
MT-11	Entre MG 2** e a laje	Um dos braços está chumbado na laje e outro no MG 2
MT-12	Laje	Próximo ao MG 2
MT-13	Pilar 3 (P3)	Retirado para execução dos furos de sondagem e reinstalado
MT-14	Câmara do servomotor	Instalado cota 618,5 (referente ao piso)

*MG 1 – Muro Guia Esquerdo

**MG 2 – Muro Guia Direito



(a) Fissura onde foi instalado o MT-8



(b) MT-8



(c) MT-9



(d) MT-10



(e) MT-11 e MT-12



(f) MT-13

Figura 47: Medidores triortogonais instalados na tomada d'água



Figura 48: Dispositivo de leituras do medidor triortogonal

5.3.1.3 Bases para Medição dos Movimentos de Fissuras (BT)

As bases para medição dos movimentos de fissuras estão localizadas em fissuras com aberturas menores em relação àquelas onde estão os MT. A locação foi realizada observando a extensão e continuidades das fissuras, com a preocupação de contemplar um grande número de pontos na tomada d'água, visto que a instalação das BT é relativamente simples e o espaço ocupado pelo equipamento é pequeno.

A instalação das bases foi realizada com um gabarito, aos pares, ficando uma em cada lado da fissura. Após o posicionamento, as bases foram coladas no concreto com adesivo estrutural de base epóxi. As BT foram confeccionadas em alumínio na oficina do LCEC. O equipamento que realiza as leituras possui resolução de 0,001 mm e campo de medida de 5 mm. A primeira leitura foi obtida após a instalação.

A Tabela 3 mostra uma síntese dos locais de instalação das BT na tomada d'água, denominação utilizada e observações relativas às instalações. As Figuras 49 a 52 trazem fotos de algumas BT instaladas em vários locais da tomada d'água, do equipamento de leitura com o gabarito de instalação, da localização das BT no pórtico de carga e de uma área, próxima ao pilar P3, onde está localizado parte das BT e dos MT, respectivamente. Os locais de instalação dos MT e das BT podem ser verificados em croquis nas Figuras 53 a 56.

Tabela 3: BT instaladas na tomada d'água da UHE Jaguari

DENOMINAÇÃO	LOCAL DE INSTALAÇÃO	OBSERVAÇÕES
BT-1	Pilar 4 (P4)	
BT-2		
BT-3	Pilar 2 (P2)	
BT-4		
BT-5		
BT-6	Pilar 3 (P3)	Local do mapeamento com o plástico
BT-7		
BT-8	Pilar 1 (P1)	
BT-9		
BT-10	MG 1*	
BT-11	Laje	Local do mapeamento com o plástico. Retiradas para a realização do furo de sondagem e posteriormente reinstaladas
BT-12		
BT-13	Pórtico de carga	
BT-14		
BT-15	Câmara do servomotor	Instaladas nas paredes internas
BT-16		
BT-17		
BT-18		
BT-19		
BT-20		
BT-21		
BT-22		
BT-23		
BT-24		

*MG 1 – Muro Guia Esquerdo



Figura 49: Bases para medição dos movimentos de fissuras instaladas na UHE Jaguari

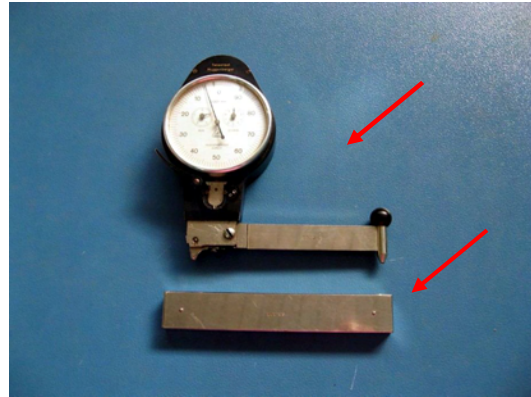


Figura 50: Aparelho de leitura e gabarito de instalação das BT



Figura 51: Localização das BT no pórtico de carga

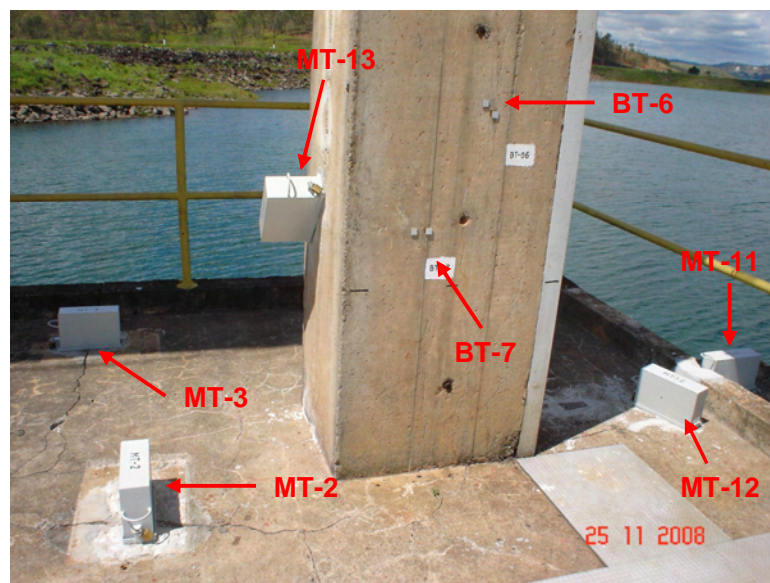


Figura 52: BT e MT

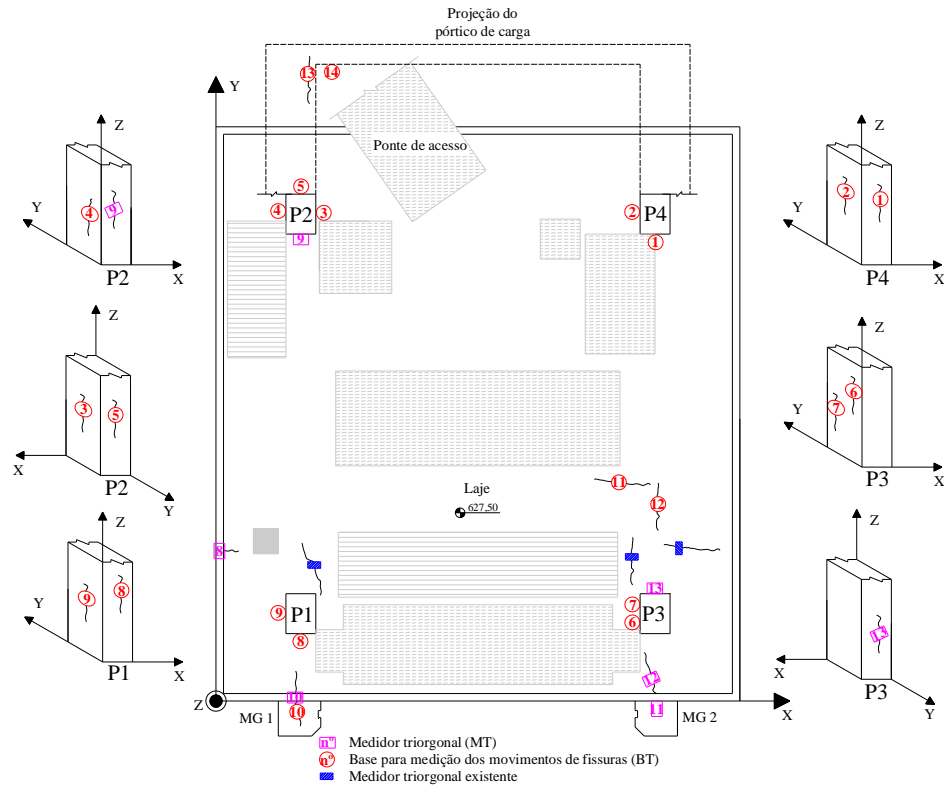


Figura 53: Localização de MT e BT na laje, pilares e pórtico de carga. Vista em planta e projeções

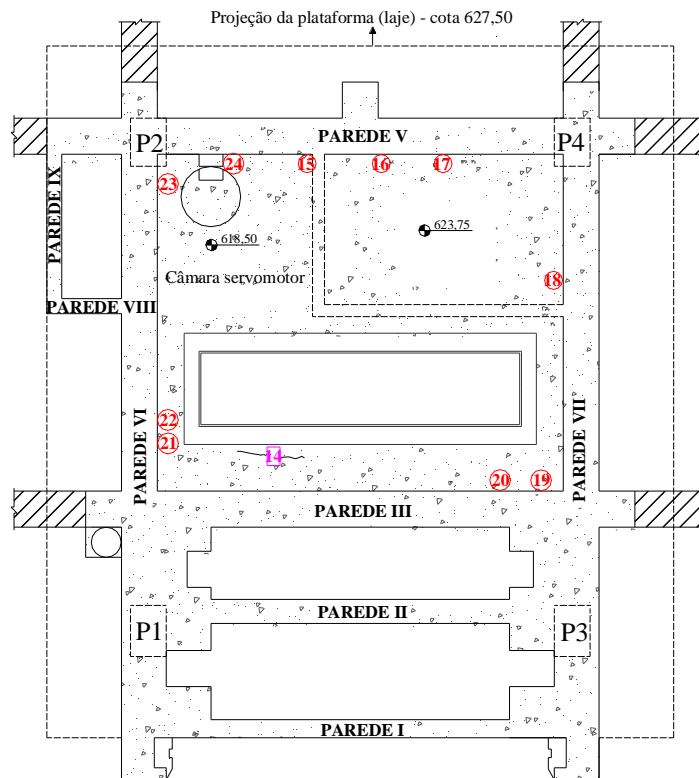


Figura 54: Localização de MT e BT nas paredes internas da câmara do servomotor. Vista em planta

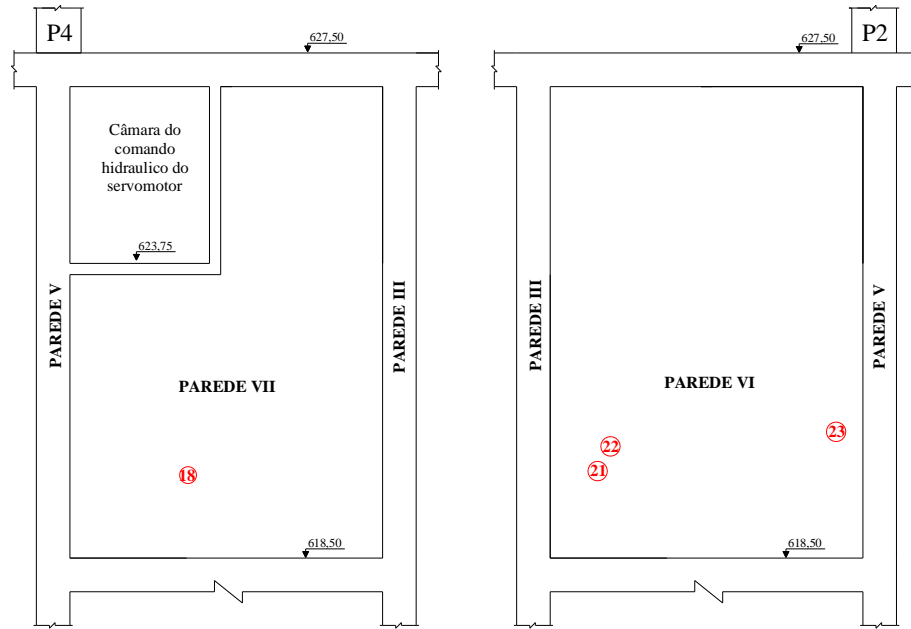


Figura 55: Localização de BT nas paredes internas da câmara do servomotor. Projeção das paredes VI e VII

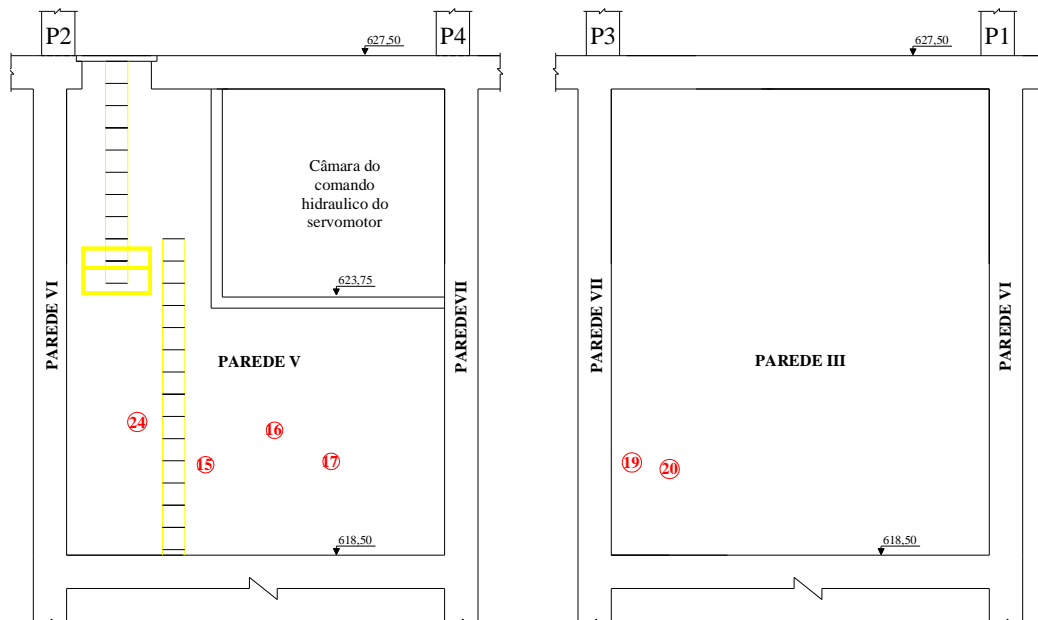


Figura 56: Localização de BT nas paredes internas da câmara do servomotor. Projeção das paredes III e V

5.3.2 Monitoramento dos deslocamentos horizontais e verticais relativos

5.3.2.1 Concepção

A observação do comportamento de estruturas afetadas pela RAA revelou que os deslocamentos horizontais para montante e o alteamento da crista são tão comuns em barragens com RAA que estão entre os sintomas clássicos da patologia. Diante do comportamento expansivo desenvolvido pelo concreto com RAA, é imperativo quantificar estes deslocamentos e observar e determinar a taxa de expansão desenvolvida. Há estruturas que desenvolvem taxas de expansão vertical anuais da ordem de $120 \cdot 10^{-6}$, como é o caso da barragem de Mactaquac (THOMAS et al. 2008), mas a ordem de valor desta grandeza depende de uma série de fatores, entre eles as características da estrutura afetada e as condições de confinamento e exposição em que se encontra.

Em virtude das condições de implantação no local da tomada d'água a opção foi utilizar um pêndulo invertido instalado em furo de sondagem executado na extensão de concreto da tomada d'água para o monitoramento dos deslocamentos horizontais. Neste caso, o pêndulo invertido fornecerá os deslocamentos horizontais da laje em relação à base de fixação do chumbador do fio, em duas direções ortogonais e, pela instalação de um dispositivo no fio, será possível realizar as leituras de deslocamentos verticais.

O equipamento determinado para o monitoramento dos deslocamentos verticais e da taxa de expansão do concreto foi o extensômetro múltiplo de hastes, que é conhecido pelo sucesso na utilização em barragens com RAA, como Peti, Moxotó, Paulo Afonso I, II, III e IV, Belesar, entre outras. Da forma como é utilizado nestas estruturas e na tomada d'água da UHE Jaguari, fornece dados relativos, ou seja, em relação a pontos da fundação ou da própria estrutura, dependendo do ponto de fixação das hastes.

Segundo Silveira (2006), dentre os equipamentos instalados, como marcos superficiais, medidores triortogonais e extensômetros múltiplos de haste, são os extensômetros que fornecem a melhor avaliação das taxas de expansão do concreto.

As cotas de instalação das hastes do extensômetro foram determinadas com o intuito de verificar ao longo da extensão vertical da estrutura os locais com diferentes expansões. Para isto, partiu-se do pressuposto de identificar a influência das tensões de confinamento e da umidade nas expansões, locando as hastes em cotas que pudessem fornecer esta

representatividade. A análise das leituras fornecidas pelo equipamento, com um longo período de observação (mínimo de um ano), permitirá estimar os deslocamentos verticais e a taxa de expansão que o concreto está desenvolvendo e caracterizar as zonas da estrutura com expansibilidade diferenciada.

O pêndulo invertido e o extensômetro de haste são equipamentos confeccionados pelo LCEC, o que corroborou para as escolhas.

5.3.2.2 Furos de Sondagem

As alternativas estudadas para as instalações do pêndulo invertido e do extensômetro de hastes, em relação às condições estruturais da tomada d'água, foram: instalar os equipamentos em tubulações fixadas na superfície das paredes verticais da tomada d'água e execução dos furos de sondagem na rocha de fundação para fixação da referência de leitura ou realizar os furos na parede de concreto da tomada d'água, chegando até a rocha de fundação. Uma empresa especializada neste serviço foi consultada e sugeriu que o furo fosse realizado na extensão de concreto da parede, por razões de operacionalidade, onde seria possível controlar e garantir a verticalidade e não haveria necessidade de contratar equipe de mergulhadores.

O local determinado para a instalação destes equipamentos foi a parede VII, que é uma estrutura em concreto armado contínua, ou seja, não possui interrupções em toda sua extensão, o que favoreceu a execução dos furos de sondagem. A locação dos instrumentos na parede fundamentou-se na escolha dos locais com melhor representatividade das expansões. Uma análise por elementos finitos, no programa SAP, demonstrou que a região próxima ao pilar P3 suporta as maiores tensões. Esta observação pode ser verificada visualmente pela existência de fissuras mais abertas no local. Portanto, esta seção da tomada d'água foi considerada crítica para o desenvolvimento de expansões e escolhida para receber o monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais, visto que na mesma região há medidores triortogonais (MT-2 e MT-3), bases para a medição do movimento de fissuras (BT-11 e BT-12) e mapeamento de fissuras, localizados na laje (cota 627,50).

Sendo assim, foram executados dois furos de sondagem afastados 40 cm da face externa da parede VII para livrar do contato com as armaduras. O primeiro, com 4" de diâmetro, foi executado para a instalação do extensômetro de hastes e se localiza a uma distância de 3,84 m da face do pilar 3, em relação ao seu centro. O segundo, realizado para a instalação do pêndulo invertido, possui 6" de diâmetro e está a 0,82 m da face do mesmo pilar,

considerando a medida no centro do furo. As Figuras 57 e 58 ilustram, respectivamente, a execução do furo de sondagem e o croqui com as localizações, em planta, na estrutura da tomada d'água.

O furo de 4" foi finalizado, pois percorreu toda a extensão de concreto da estrutura e parte da rocha de fundação, respeitando o requisito de verticalidade imposto, chegando a profundidade total de 64,30 m. O furo de 6", no entanto, perdeu a verticalidade para a correta instalação do pêndulo invertido. Este furo seguiu perfeito até a profundidade de, aproximadamente, 28 m, posteriormente, aconteceu uma inclinação de cerca de 2°, conforme relatado pela empresa que estava executando os serviços. Este furo foi finalizado com 50,36 m, quando encontrou armadura longitudinal na direção do furo.

Portanto, a instalação do pêndulo invertido ficou comprometida para o momento. A extensão vertical do furo de 6" foi aproveitada para a instalação de outro extensômetro de haste.



(a) Perfuratriz iniciando o furo



(b) Testemunhos extraídos

Figura 57: Furo de sondagem

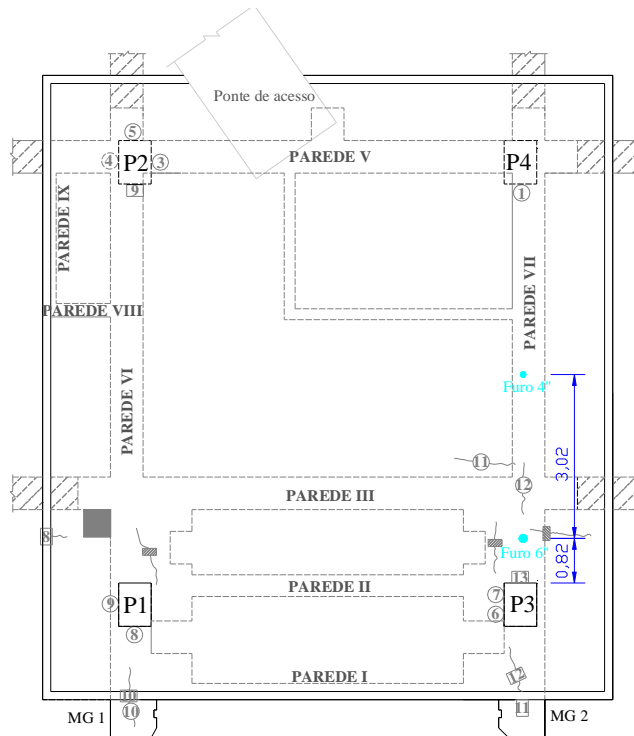


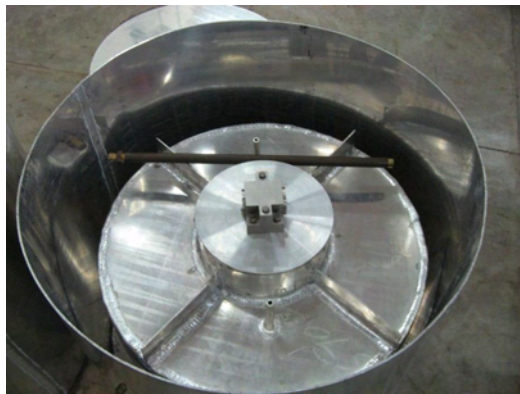
Figura 58: Localização dos furos de sondagem. Planta

5.3.2.3 Pêndulo Invertido

Para a instalação do pêndulo invertido será verificada outra localização na tomada d'água e a abertura de nova licitação para a execução de outro furo de sondagem. A previsão é instalar o instrumento em tubulações presas à superfície da parede da tomada d'água e realizar a sondagem na rocha de fundação para fixação de uma referência de leitura. Enquanto isso, o monitoramento dos deslocamentos horizontais, sentido montante/jusante, está sendo feito por técnicas geodésicas, especificamente pelo método das colimações, em termos absolutos.

A instalação do pêndulo invertido consistirá de uma estrutura metálica que servirá de suporte para o recipiente de óleo com o flutuador e o fio e a base de leitura. Esta estrutura ficará na laje da tomada d'água. A parte inferior do fio será fixada na rocha de fundação. Com este princípio de instalação será possível realizar o monitoramento dos deslocamentos horizontais da laje, que é reflexo da movimentação de toda extensão da estrutura, em relação a um ponto na fundação, logo abaixo do contato concreto/rocha.

As Figuras 59 e 60 ilustram as partes do pêndulo invertido que foram confeccionadas pela oficina do LCEC e a estrutura que servirá de suporte e proteção para o recipiente de óleo e a base de leitura, respectivamente.



(a) Recipiente com flutuador



(b) Detalhe do flutuador. Ao fundo, recipiente com tampa

Figura 59: Recipiente e flutuador do pêndulo invertido



(a) Estrutura metálica de suporte



(b) Detalhe da base de leitura e apoio do recipiente de óleo

Figura 60: Estrutura de suporte e proteção do pêndulo invertido

5.3.2.4 Extensômetro de Haste nº 1 (EH-1)

O extensômetro de haste 1 (EH-1) foi instalado no furo de sondagem de 4", localizado a 3,84 m do pilar 3, que foi perfeitamente terminado e previamente determinado para tal utilização. Este furo foi executado em toda extensão do concreto, adentrando na rocha de fundação, o que permitiu que o EH-1 fosse instalado com três hastes. A primeira haste (H1) está chumbada na rocha de fundação, a haste 2 (H2) está na cota 587,50, onde, abaixo desta, a estrutura está em parte apoiada em maciço rochoso e julga-se ser um local mais confinado e a haste 3 (H3) está na cota 614,00, que é intermediária na variação do nível d'água do reservatório. A Tabela 4 traz características resumidas do furo executado e das hastes instaladas. A Figura 61 ilustra o perfil de instalação do EH-1, com as respectivas cotas de instalação e de chumbamento.

As hastes foram revestidas com borracha de polietileno, comum para a instalação de extensômetros múltiplos, porém, este revestimento não suportou a elevada pressão causada pela profundidade de instalação, visto que o furo estava preenchido com água até o nível do reservatório. Portanto, as hastes foram revestidas com tubos de PVC de diâmetro de ¾". Para o chumbamento das hastes foi utilizado um graute para uso submerso e o preenchimento do furo foi realizado com pedrisco da região da UHE Jaguari.

A borracha de polietileno danificada comparada com outra sã e uma foto do pedrisco utilizado para o preenchimento do furo estão nas Figuras 62 e 63, respectivamente. A seqüência de instalação das hastes do EH-1 está nas Figuras 64 e 65 e a instalação da cabeça de leitura pode ser verificada na Figura 66. A cabeça de leitura foi protegida com caixa metálica.

Da forma com que o EH-1 foi instalado será possível obter as informações de deslocamentos verticais e taxas de expansão do concreto das regiões determinadas pelas cotas de chumbamento das hastes e fazer comparações. As instalações aconteceram no período de 17 a 24/08/2009.

Tabela 4: Características das hastes e do furo de sondagem – EH-1

	Comprimento (m)	Cota de instalação (m)	Data de instalação
H1	64,48	563,20	20/8/2009
H2	40,18	587,50	21/8/2009
H3	13,68	614,00	22/8/2009
Topo/Leitura	-	627,68	23/8/2009
Diâmetro furo	Profundidade do furo (m)		
	Concreto	Rocha	Total
4"	62,70	1,60	64,30

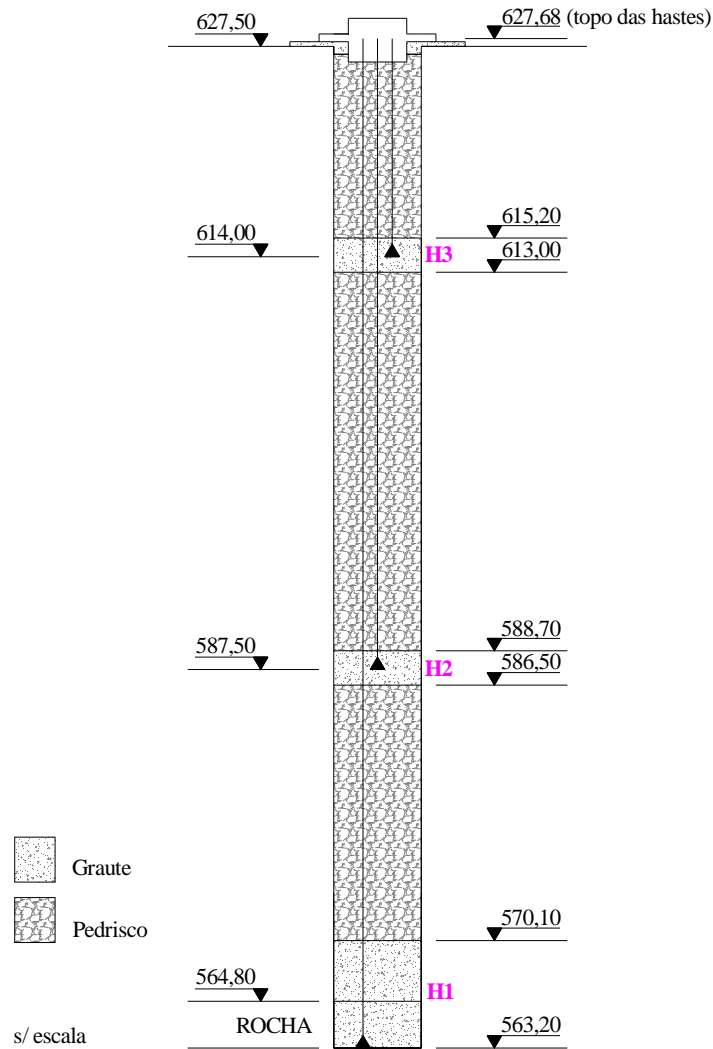


Figura 61: Perfil de instalação do EH-1



Figura 62: Borracha de Polietileno danificada



Figura 63: Pedrisco para preenchimento dos furos



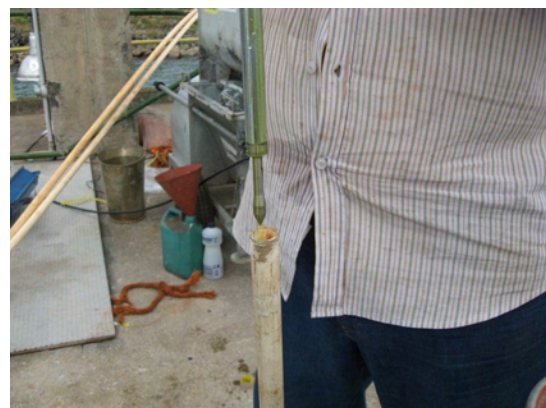
(a) Chumbador das hastes fixo no PVC



(b) Tubo de PVC sendo colocado no furo



(c) Tubo de PVC sendo preenchido com lubrificante



(d) Pino guia de ancoragem sendo colocado no PVC

Figura 64: Instalação das hastes do EH-1 – parte 1



(a) Colocação das hastes no tubo



(b) Aplicação de graute para chumbamento



(c) Graute na betoneira



(d) Preenchimento com pedrisco



(e) Ajuste do apoio para relógio comparador



(f) Hastes prontas para receber a cabeça de leitura

Figura 65: Instalação das hastes do EH-1 – parte 2



(a) Gabarito de instalação



(b) Chumbamento com a caixa de proteção



(c) Instalação da cabeça de leitura



(d) Primeira leitura

Figura 66: Instalação da cabeça de leitura do EH-1

5.3.2.5 Extensômetro de Haste nº 2 (EH-2)

O extensômetro de haste 2 (EH-2) foi instalado no furo de 6", que seria utilizado para o pêndulo invertido, com duas hastes. As hastes deste instrumento foram instaladas ao longo da extensão vertical e, pelo diâmetro e inclinação do furo, foi possível fixá-las em cotas de instalação correspondentes às hastes H2 e H3 do EH-1. Isto foi feito com o intuito de tornar o EH-2 um correspondente do EH-1 e servir de aferição, visto que ambos estão próximos e na mesma parede.

As condições de instalação foram as mesmas adotadas para o EH-1 (proteção das hastes com tubo de PVC de 3/4", chumbamento com graute submerso e preenchimento com o mesmo pedrisco). As características do furo e da instalação das hastes estão resumidas na Tabela 5 e a Figura 67 ilustra o perfil de instalação do extensômetro no furo de sondagem. As hastes do

EH-1 e EH-2 foram instaladas em sequência. As Figuras 68 e 69 trazem fotos da instalação do EH-2 e dos dois extensômetros depois de instalados, respectivamente.

Tabela 5: Características das hastes e do furo de sondagem – EH-2

	Comprimento (m)	Cota de instalação (m)	Data de instalação
H1	40,08	587,60	21/8/2009
H2	13,68	614,00	22/8/2009
Topo/Leitura	-	627,68	23/8/2009
Diâmetro furo	Profundidade do furo no concreto (m)		
	Vertical	Inclinado	Total
6"	28,00	22,36	50,36

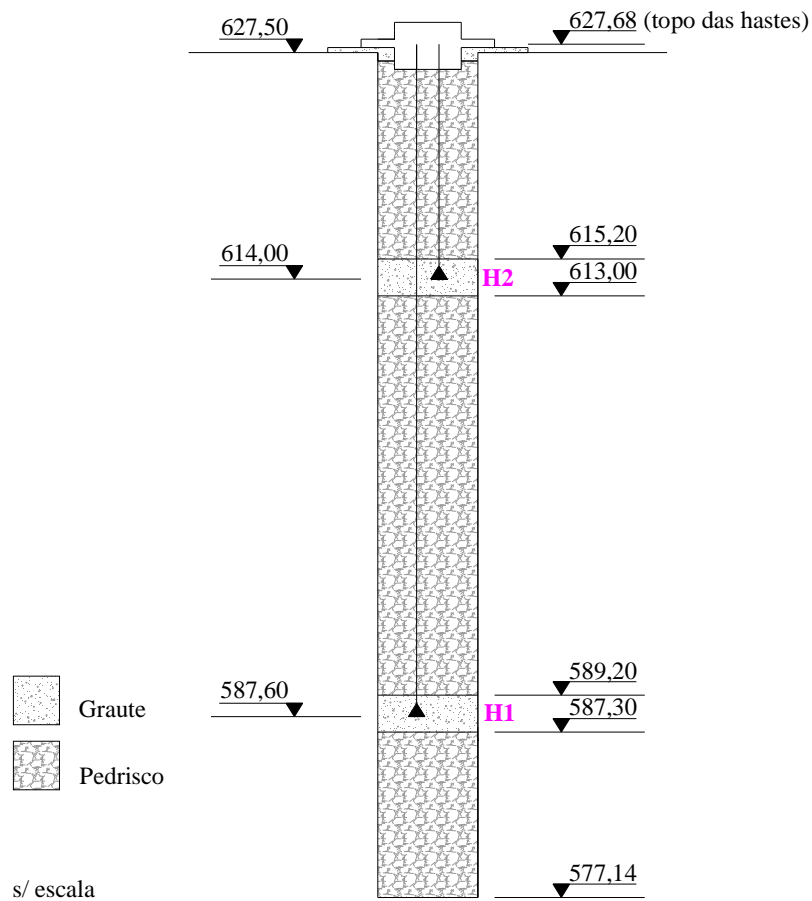


Figura 67: Perfil de instalação do EH-2



(a) Hastes do EH-1 e EH-2



(b) Ajuste das hastes para receber a cabeça de leitura



(c) Instalação da cabeça de leitura



(d) Primeira leitura

Figura 68: Instalação do EH-2

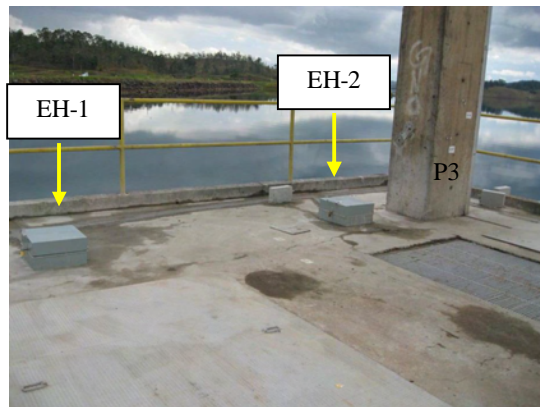


Figura 69: Extensômetros múltiplos de hastes instalados

5.3.3 Monitoramento dos deslocamentos relativos entre os muros guia da grade

5.3.3.1 Concepção

No caso da UHE Jaguari, o monitoramento dos deslocamentos entre os muros guia da grade é de extrema importância pelo nível de deterioração apresentado por esta estrutura. A observação da parte superficial (acima do nível d'água) evidenciou descolorações no concreto e fissurações nas faces. Os muros são estruturas que suportam a guia metálica da grade e, as deformações neste local, oriundas da expansibilidade da RAA, poderão vir a desalinhar e a comprometer a movimentação da peça. É possível observar, pela Figura 34, um possível deslocamento diferencial da guia metálica no muro guia da direita. A Figura 70 traz uma visão aproximada dos muros guia da grade. Este monitoramento fornecerá uma estimativa dos movimentos relativos entre os muros, reflexo das expansões ocasionadas pela RAA e das movimentações que tem acontecido em outros pontos da estrutura.

A estrutura da tomada d'água tem características muito peculiares e são várias as dificuldades para a realização da medida de deslocamentos relativos entre estes muros, entre elas se destacam a forma de realizar a leitura - é perigoso e difícil realizar a aquisição dos dados manualmente, o leitorista teria que se expor externamente – o pequeno espaço para a instalação de equipamentos e a elevada distância entre os muros (6,3 m), além da necessidade de utilização de equipamentos com resolução da ordem de 0,01 mm, imposto pela grandeza dos deslocamentos que se esperam medir, originários da RAA.

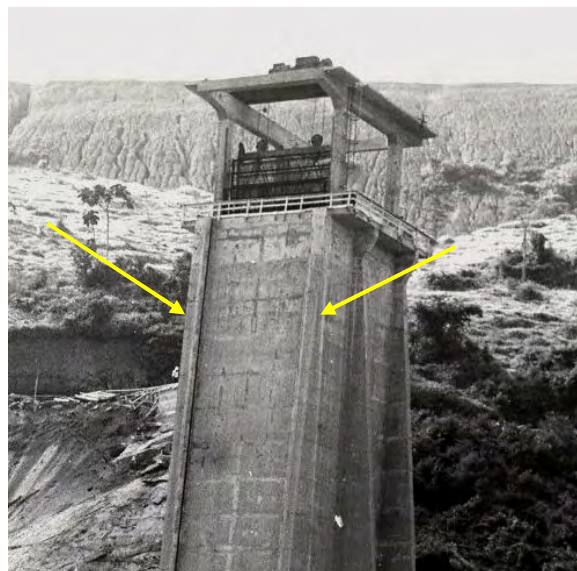


Figura 70: Detalhe aproximado dos muros guia da grade

Diante da necessidade de monitoramento dos deslocamentos relativos, das dificuldades impostas pelo local e da ordem de grandeza dos deslocamentos, buscou-se um equipamento com princípio de funcionamento ótico que pudesse realizar esta medida com precisão e resolução adequadas e com sistema de aquisição de dados remoto.

A alternativa inicial estudada foi o desenvolvimento de um equipamento de fibra ótica para a realização das medições. O desenvolvimento deste equipamento deveria incluir a ajuda de técnicos especialistas no princípio de funcionamento da fibra ótica. Uma empresa representante da tecnologia no país se dispôs a ajudar neste desenvolvimento, porém, o valor orçado foi elevado para o montante disponível no projeto de P & D. Além de assumir o custo do desenvolvimento de sistema em fibra ótica para a aplicação na medição dos deslocamentos relativos dos muros guia da grade, havia a necessidade de verificação de outras grandezas, como deslocamentos verticais, horizontais e em fissuras. Diante disto, buscou-se um equipamento que satisfizesse os requisitos almejados, por menor custo.

A segunda alternativa estudada foi o desenvolvimento de um extensômetro de fio, adaptado para o local da medição. O princípio de funcionamento do equipamento é, basicamente, transmitir os movimentos do muro a um local determinado, por um fio de invar. O fio de invar ficaria fixo no muro e em local considerado livre da influência de deslocamentos provenientes de RAA estaria preso em um peso com relógio comparador acoplado. O inconveniente encontrado foi a repetibilidade dos resultados com a utilização de relógio comparador com resolução de 0,01 mm. O equipamento está em fase de pesquisas e adaptações no Laboratório CESP de Engenharia Civil.

Em paralelo ao desenvolvimento do extensômetro de fio, outros equipamentos foram pesquisados. No âmbito da tecnologia de medição com princípio ótico, onde está inserida a fibra ótica, existem equipamentos medidores de deslocamento a laser com resolução, precisão, durabilidade e custo compatíveis com as necessidades do projeto. Estes equipamentos são utilizados originalmente para uso industrial.

A distância entre os muros em estudo é de 6,3 m e os equipamentos laser que têm este campo de atuação fornecem resoluções da ordem de 1 mm. Para obter resolução de 0,01 mm, o equipamento laser deve ficar muito próximo do objeto de leitura.

Portanto, para a realização do monitoramento dos deslocamentos relativos entre os muros guia da grade foi desenvolvido um aparato de medição com a utilização de um equipamento laser de resolução de 0,01 mm (10 μ m), suportado por um aparato de sustentação e adaptado a

um sistema de aquisição de dados, programado para realizar e armazenar as leituras. Também foram utilizados sensores de temperatura no aparato para indicar as variações térmicas e suas influências no funcionamento do conjunto, possibilitando mitigar as influências térmicas das leituras.

5.3.3.2 Características do medidor de deslocamentos a laser

O sensor laser utilizado é do fabricante Micro-Epsilon, série optoNCDT 1300, modelo ILD 1300-50. Este equipamento possui princípio de medição por triangulação óptica, onde operam com um diodo laser que projeta um raio de luz na superfície a ser medida. A luz é refletida e digitalizada por um sistema de recepção ótico. Se o ponto de luz muda a sua posição, esta mudança é digitalizada e avaliada (MICRO-EPSILON, 2007a)

Segundo Dorsch et al. (1994) um dos princípios de funcionamento mais comuns em sensores de deslocamento comercial é a triangulação de laser, devido a sua simplicidade e robustez.

O laser é energizado com uma fonte de corrente contínua. O sinal de saída do equipamento é dado em corrente elétrica, que por sua vez é proporcional ao deslocamento digitalizado pelo equipamento. As informações das leituras são transmitidas, por cablagem, a um sistema eletrônico de aquisição de dados, que gerencia as leituras por meio de um software desenvolvido para esta finalidade.

As principais características do equipamento estão especificadas no Quadro 3. Pode ser observado que o campo de medida inicia em 45 mm e termina em 95 mm, possuindo, portanto, 50 mm e que a metade deste fica a uma distância de 70 mm do objeto de medição. A Figura 71 ilustra as dimensões do equipamento e simula a reflexão do raio laser e do campo de medida. Fotos do medidor estão na Figura 72.

Quadro 3: Principais características do medidor de deslocamentos laser

Campo de medida (CM)	50 mm
Início CM	45 mm
Meio CM	70 mm
Fim do CM	95 mm
Linearidade	100 μm
Resolução	10 μm
Diâmetro raio	110 μm
Peso	100 g
Temperatura de operação	0 a +55°C

Fonte: Adaptado de Micro-Epsilon (2007a)

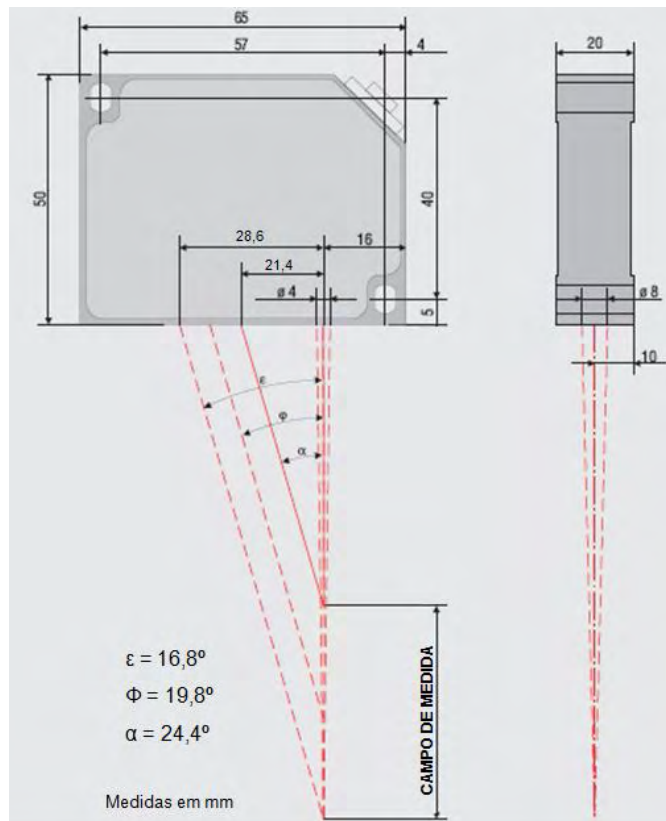


Figura 71: Croqui do medidor laser, modelo ILD 1300-50

Fonte: Adaptado de Micro-Epsilon (2007a)



Figura 72: Medidor de deslocamentos laser

5.3.3.3 Particularidades do aparato de medição

O equipamento laser realiza as medidas de deslocamentos relativos entre os muros por intermédio de um aparato de sustentação, que consiste, basicamente, em uma viga, onde uma das extremidades está engastada em um dos muros e a outra é livre e utilizada para suportar o equipamento laser próximo ao outro muro.

No entanto, alguns detalhes devem ser levados em consideração para o perfeito funcionamento do aparato de medição, como a influência da temperatura na dilatação térmica do material de sustentação do equipamento.

O conjunto dos componentes utilizados para sustentar o equipamento de medição a laser é chamado de aparato de sustentação. O aparato de medição, citado no texto, é o aparato de sustentação já com o equipamento laser e com os sensores de temperatura.

Intensas pesquisas foram realizadas na busca de um material que satisfizesse as condições de resistência e temperatura requeridas. A conclusão foi pela utilização de uma viga treliçada de aço comum em combinação com aço invar, com algumas peculiaridades. Uma barra maciça de invar foi apoiada sobre uma viga metálica treliçada e o equipamento laser está fixado na barra de invar, devido ao baixo coeficiente de dilatação térmica linear (α) deste material e ao comportamento linear apresentado frente às variações de temperatura. Uma das extremidades da barra está engastada em um dos muros e a outra suporta o sensor laser, próximo ao outro muro. A viga metálica treliçada tem a função de suporte da barra de invar, que por sua vez recebe o equipamento de leitura.

A sistemática utilizada para o aparato de medição permite realizar o monitoramento dos deslocamentos de abertura e/ou fechamento que ocorrem entre os muros.

O aço invar é uma liga metálica especial, constituída, principalmente, de 36% de Níquel, o que fornece ao material um coeficiente de dilatação térmica linear (α) da ordem de $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (GIECK, 1975). Este material é tido, para a maioria das aplicações, como referência de calibração para outros materiais por possuir um α considerado muito baixo. No entanto, para a utilização desejada e considerando condições extremas para o local, uma estimativa da variação da dimensão longitudinal da barra de invar, causada pela dilatação térmica linear, forneceu o valor de 0,28 mm. Este valor é maior que a resolução do equipamento e a ordem de grandeza esperada para os deslocamentos dos muros, no período inicial de leituras. Portanto, as leituras de deslocamentos realizadas pelo laser estão compostas de duas parcelas, uma referente à variação térmica do invar e outra ao deslocamento relativo dos muros. Como a leitura de interesse é o deslocamento relativo entre os muros, é descontado da leitura do laser o efeito da dilatação térmica linear do material.

Os cálculos da dilatação térmica linear e dos deslocamentos dos muros são realizados, simplificadamente, pelas fórmulas (1), (2) e (3), respectivamente.

$$\Delta L = L_0 * \alpha * \Delta T \quad (1)$$

$$L_t = L_{\text{laser}} - 0,30 \quad (2)$$

$$L = L_t - \Delta L \quad (3)$$

Sendo:

ΔL – parcela referente à dilatação térmica linear.

L_0 – comprimento inicial da barra de invar.

ΔT – variação de temperatura ($T_f - T_0$).

T_f – temperatura final, no instante da leitura de deslocamento.

T_0 – temperatura inicial.

L_t – deslocamento total.

L_{laser} (ou D1) – leitura do laser.

L – deslocamento relativo dos muros (deslocamento real).

Para a obtenção da parcela referente à dilatação térmica, existem três sensores monitorando a temperatura na barra de invar, detalhados no item 5.3.3.6. A medida de temperatura utilizada nos cálculos de dilatação térmica linear é referente à média dos três pontos de monitoramento.

No ato da instalação do aparato de medição, foram feitas as medidas iniciais de temperatura ($T_0 = 24,6^\circ\text{C}$, correspondente à média de três sensores de temperatura), e comprimento inicial ($L_o = 6201 \text{ mm}$) do ponto de fixação do laser na barra de invar ao ponto de engaste, no outro muro.

O equipamento laser foi posicionado na barra de invar para ficar o mais próximo possível do ponto zero. No Laboratório CESP de Engenharia Civil foi elaborado um dispositivo de fixação e ajuste do equipamento no local que permitiu o feito. Mesmo com um ajuste mais fino o equipamento laser ficou deslocado de $+ 0,3 \text{ mm}$ do zero, o que pode ser corrigido pela fórmula (2). Este valor é considerado baixo e não deverá prejudicar o campo de medida do equipamento, visto que este é de $\pm 25 \text{ mm}$.

Para realizar o ajuste fino foi necessário instalar o sistema de aquisição de dados para avaliar o posicionamento do equipamento laser.

O sistema de aquisição de dados fornece a leitura realizada pelo laser (L_{laser} ou D1) e os três pontos de monitoramento da temperatura da viga no instante da leitura realizada pelo equipamento laser. Uma programação simplificada das fórmulas (1), (2) e (3) em planilhas eletrônicas permite obter os resultados dos deslocamentos relativos entre os muros.

A obtenção indireta dos deslocamentos relativos possui incertezas embutidas nos resultados, tanto na leitura com o laser, o qual já é determinado pelo fabricante, quanto no cálculo da dilatação térmica do material. A ordem de grandeza esperada para os deslocamentos referentes à RAA é muito pequena (centésimos de mm), portanto, deve ser verificado se as incertezas de medição estão compatíveis com os deslocamentos esperados para os muros.

Utilizando a teoria de erros de Aquino (2007), a estimativa das incertezas na medição indireta dos deslocamentos relativos entre os muros guia da grade é de $0,01 \text{ mm}$, ou seja, é compatível com os deslocamentos que se esperam medir. Os cálculos realizados para encontrar a incerteza estão descritos, com detalhes, no apêndice A.

A análise das incertezas foi realizada também para utilização de barra de aço comum, considerando $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$, conforme consta em Gieck (1975), em substituição à barra de invar. O deslocamento decorrente da dilatação térmica do material, nas mesmas condições extremas consideradas para o invar, foi de $(2,23 \pm 0,01)$ mm e a obtenção da medida do deslocamento entre os muros forneceu uma incerteza de 0,02 mm. Devido à ordem de grandeza dos deslocamentos decorrentes da RAA, considerada para a ocasião, a incerteza ideal para a obtenção imediata dos valores dos deslocamentos é de 0,01 mm. Se esta incerteza for superior, o tempo para a aquisição dos dados de deslocamentos relativos confiáveis poderá ser demasiadamente alto. Além disso, as condições de instalação e exposição do aparato de medição, como umidade, insolação, utilização de soldas e chumbadores, também influenciam para os deslocamentos e incertezas, mesmo que em pequena grandeza. Em virtude do exposto, a opção foi trabalhar a favor da segurança e utilizar o invar para apoio do medidor laser, por ser um material com comportamento linear em relação às variações de temperatura, inoxidável e possuir baixo coeficiente de dilatação térmica linear.

5.3.3.4 Detalhamento do aparato de medição

O aparato de medição deve respeitar o limite de largura imposto pela movimentação da grade. As medições realizadas na parte superior dos muros indicaram que este limite é de 60 mm, no entanto, há irregularidades na parede I (local que foi instalado o aparato) que podem interferir na passagem da peça, mesmo respeitando o limite indicado. A Figura 73 ilustra o muro, as dimensões de suas aberturas e o espaço livre para a instalação da viga.

A distância entre os muros guia, medida na parte superior, é de 6300 mm. A viga foi planejada para a extremidade livre ficar distanciada 30 mm do muro, menor que o meio do campo de medida do laser, que é de 70 mm, sendo confeccionada com comprimento de 6270 mm. Este cuidado foi tomado para evitar discordâncias com o campo de medida do equipamento e possibilitar o seu ajuste local.

A viga possui largura de 50 mm, altura de 500 mm e comprimento de 6270 mm. A barra de invar, de mesmo comprimento e seção transversal quadrada de $\frac{3}{4}$ ", está apoiada em cima da viga e, para não haver atrito, foram colocados roletes ajustáveis entre elas, de forma que os movimentos decorrentes dos diferentes coeficientes de dilatação térmica linear estejam desvinculados, o que pode ser observado na Figura 74 que traz o projeto da viga e a esquematização do aparato de medição com laser. Algumas adaptações foram realizadas no

sistema de apoio da viga, em relação ao projeto inicial que está na Figura 74, para a correta utilização do aparelho de leitura. As principais foram: substituir a cantoneira superior da extremidade móvel por uma cantoneira guia encaixada na parte frontal da viga treliçada e fixa no muro, inserir pontos de apoio intermediários com cantoneiras e roletes e colocar pontos de contraventamento.

Os roletes para apoio da barra de invar foram confeccionados com ranhuras e com um sistema que permite o ajuste da altura, desta forma foi possível posicionar a barra mais alinhada possível na instalação.

Os pontos de fixação e apoio da viga são feitos da seguinte forma: a viga metálica treliçada recebe duas cantoneiras, soldadas na face inferior e superior de uma das extremidades, para engastamento no muro. A extremidade livre apóia em um rolete sobre cantoneira que está fixa no outro muro e há uma cantoneira guia para direcionar e estabilizar a viga, permitindo movimento na direção horizontal. Há três pontos de apoio intermediários com roletes sobre cantoneiras para evitar flechas elevadas no meio do vão e dois pontos de contraventamento em montantes da treliça.

As Figuras 75 e 76 trazem, respectivamente, a confecção da viga treliçada na oficina do Laboratório CESP de Engenharia Civil e ilustrações das cantoneiras com roletes e dos pontos de fixação e apoio da viga, em fotos da simulação da montagem e funcionamento do aparato de medição, realizada no LCEC.

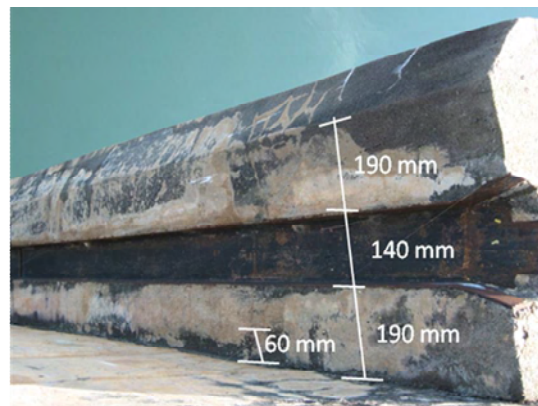


Figura 73: Dimensões dos muros guia da grade. Vista lateral direita – muro guia da esquerdo

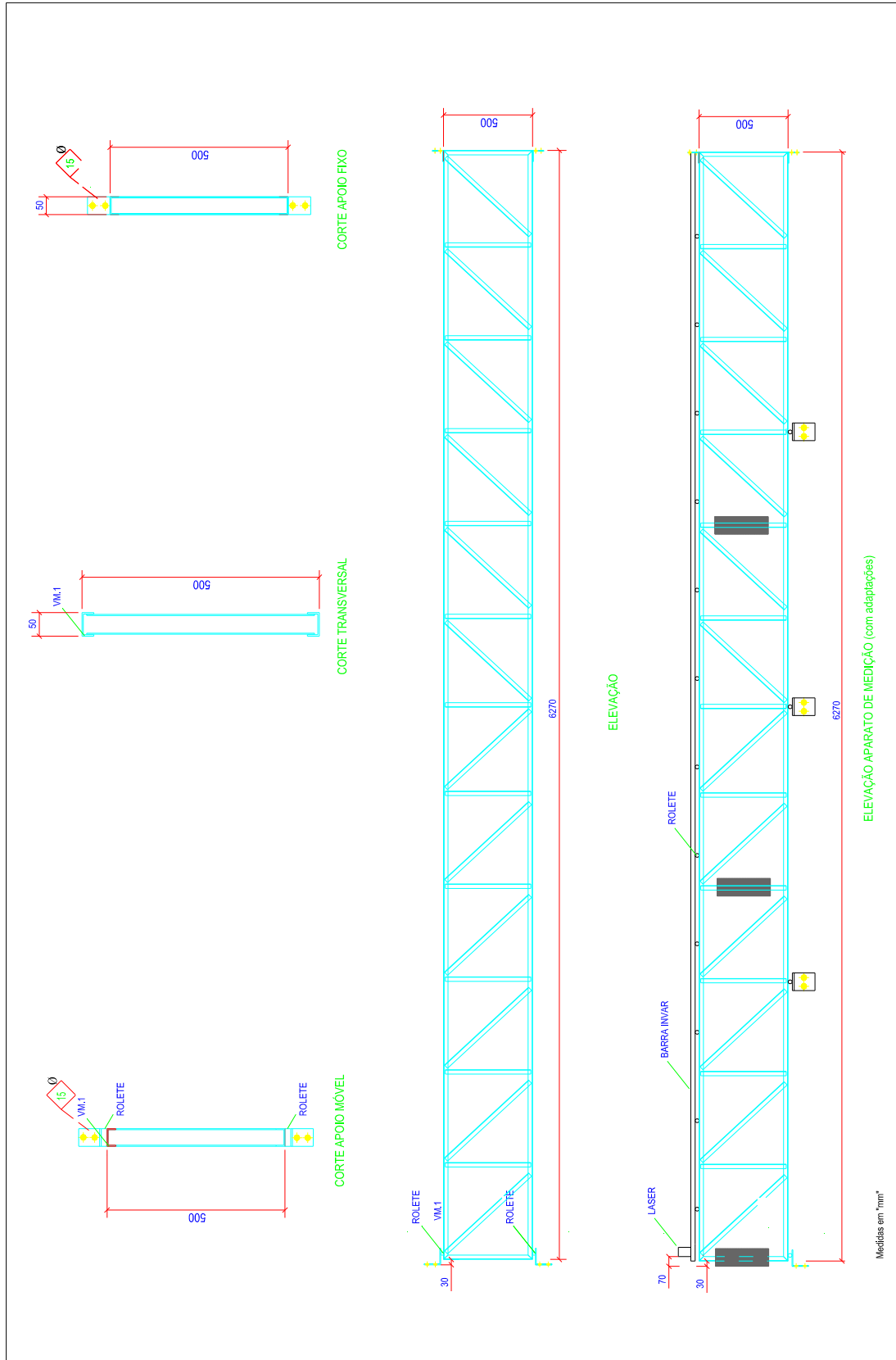


Figura 74: Projeto da viga metálica e aparato de medição – laser



Figura 75: Confeção da viga metálica treliçada



(a) Aparato de sustentação do laser



(b) Apoio intermediário e apoio da extremidade engastada



(c) Apoio da extremidade livre e cantoneira guia



(d) Detalhe do rolete ajustável verticalmente e com ranhura para alinhar a barra

Figura 76: Simulação da montagem e funcionamento do aparato de sustentação do laser

5.3.3.5 Instalação do aparato de medição

O aparato de medição foi colocado na parte superior dos muros, acima do nível d'água por questões de simplificação técnica na instalação e pelo princípio de funcionamento do equipamento laser não permitir a sua submersão. A distância da laje à superfície da barra de invar é de 2,00 m. Esta distância foi determinada em função do nível d'água máximo registrado no reservatório que chegou à cota de 623,44 m, aproximadamente 4 m abaixo do nível da laje. Portanto, a opção foi colocar a parte superior do aparato de medição na metade para dificultar o acesso pela laje e assim evitar danos por vandalismo. O monitoramento deste local fornecerá uma estimativa das movimentações que estão agindo no muro.

Os pontos de apoio intermediários da viga metálica estão fixados na parede I. A extremidade da viga com as cantoneiras soldadas foi colocada no muro guia esquerdo, com chumbadores. A extremidade livre está apoiada na cantoneira com rolete chumbada no muro guia direito. Esta extremidade ficou distanciada 50 mm do muro, aproximadamente. A barra de invar apoiada sobre a viga foi soldada na cantoneira que fica na face superior da viga, chumbada no muro guia esquerdo. No muro guia direito foi colocado uma chapa de alumínio no local de reflexão do raio laser, evitando, assim, possíveis interferências nas leituras.

A convenção adotada foi o apoio móvel ficar no muro guia direito, devido ao fato de estar mais próximo do local de locação do sistema de aquisição de dados, o que diminuiu o comprimento do cabo do sensor de deslocamento.

Para a instalação do aparato no local foi necessário utilizar um andaime suspenso que foi suportado e movimentado pela ponte rolante existente no local, como exemplificado nas fotos da instalação, na Figura 77.

O aparato de medição foi protegido com uma estrutura metálica fixa na viga treliçada de suporte por meio de dobradiças que permitem a abertura para manutenção. Além disso, a proteção metálica foi coberta com borrachas presas na parede I, para minimizar os efeitos da umidade proveniente de chuvas. A Figura 78 ilustra o aparato de medição instalado e protegido.



(a) Ponte rolante com andaime suspenso



(b) Fixação dos apoios intermediários na parede I



(c) Apoio da extremidade livre e cantoneira guia



(d) Viga metálica posicionada



(e) Posicionamento da barra de invar na viga



(f) Frentes de trabalho. Instalação das hastes dos extensômetros e dos aparatos de medição

Figura 77: Instalação do aparato de medição com laser

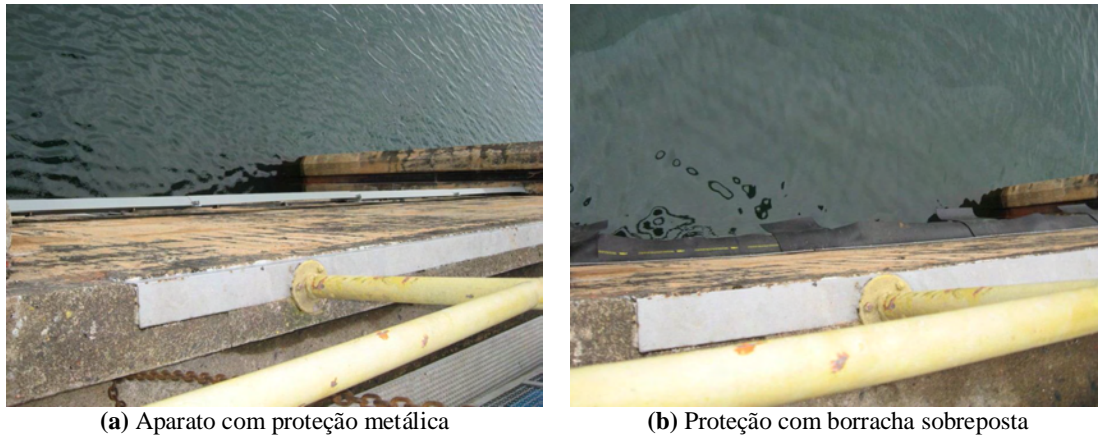


Figura 78: Aparato de medição instalado e protegido

5.3.3.6 *Medição da temperatura na barra de invar*

Devido às necessidades de mitigar os efeitos de temperatura da barra nos cálculos de deslocamentos, foi elaborado um sistema de observação de temperatura, onde os sensores possuem um sistema eletrônico integrado que permite que estes estejam interligados a um sistema de aquisição de dados para a realização das leituras de forma programada, compatíveis com os horários das medições de deslocamentos. Os sensores emitem uma saída elétrica em corrente, proporcional à temperatura do local.

O medidor de temperatura é um sensor comercial de platina. O sistema eletrônico integrado do termômetro foi desenvolvido pela equipe técnica, especializada em eletrônica, do Laboratório CESP de Engenharia Civil.

Foram confeccionados seis sensores com resolução de 0,1 °C para monitorar três pontos em cada barra de invar, uma vez que há dois aparatos de medição (o segundo aparato está detalhado no item 5.3.4). Estes foram calibrados para trabalhar com uma faixa de temperatura de 0 a 60 °C.

O sensor e o respectivo sistema eletrônico integrado foram alocados em uma proteção desenvolvida para tal finalidade, com sistema de acoplamento térmico. A Figura 79 traz o sensor com o sistema eletrônico e a proteção e a Figura 80 mostra a calibração dos mesmos.

Os sensores com as proteções foram colocados em furos transversais realizados na barra de invar, igualmente espaçados. No caso da barra de invar integrante de aparato de sustentação do laser, que possui 6270 mm, os sensores de temperatura ficaram espaçados,

aproximadamente, a cada 1500 mm (1,5 m). A Figura 81 traz uma esquematização da barra de invar com as posições e as denominações dos sensores de temperatura e do equipamento laser.

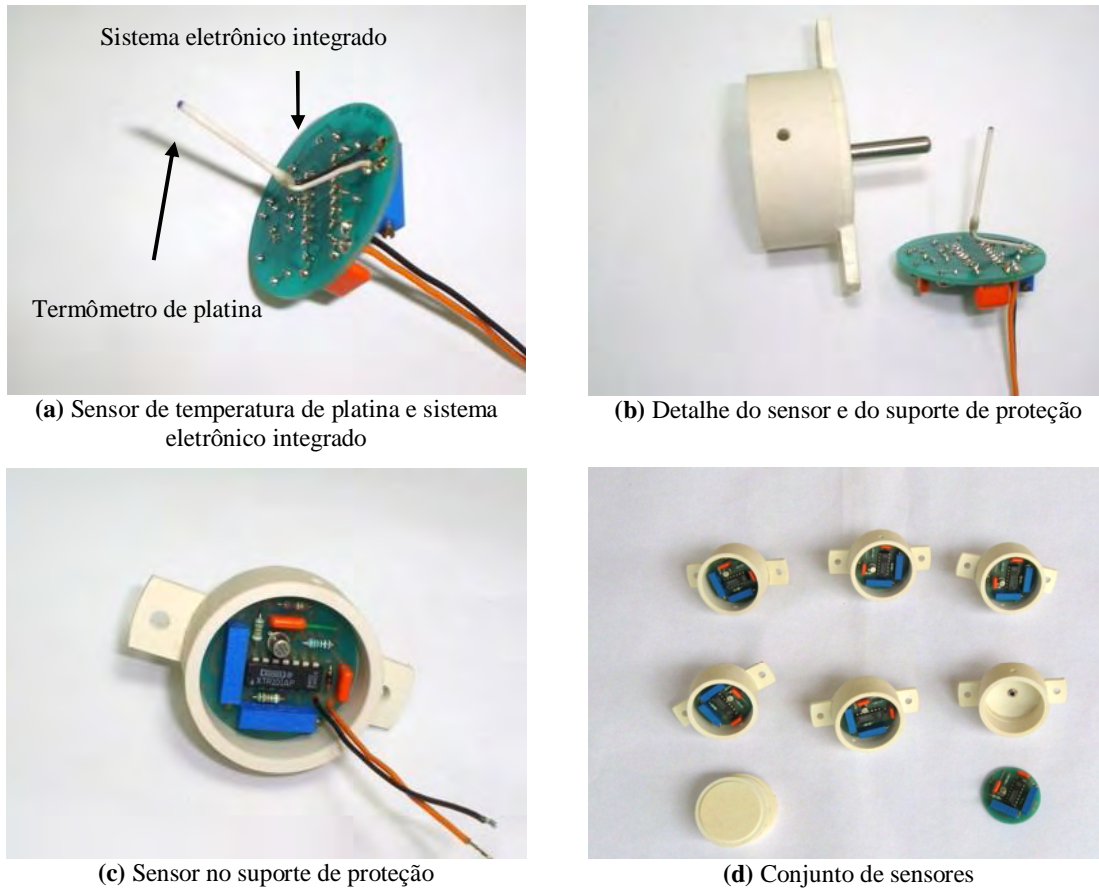


Figura 79: Sensor de temperatura e sistema eletrônico integrado

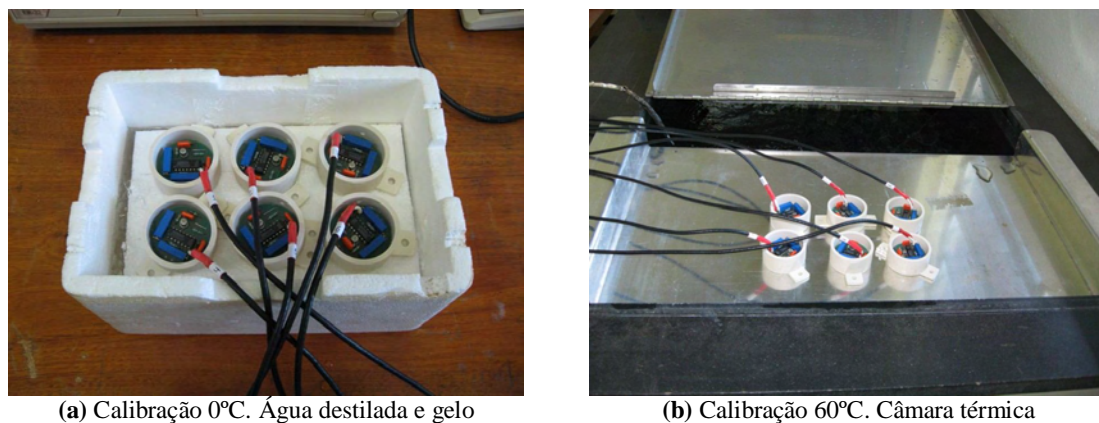


Figura 80: Calibração do termômetro

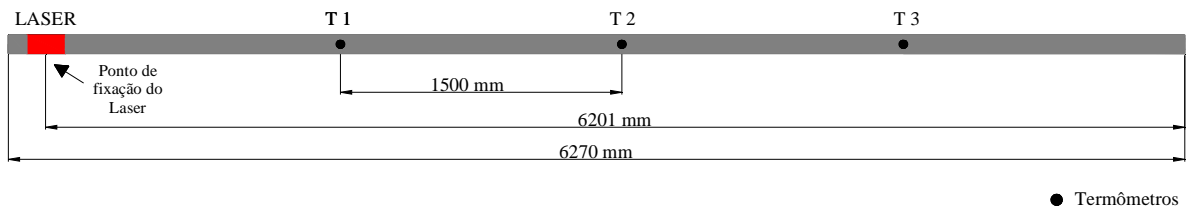


Figura 81: Posicionamento e denominação dos termômetros do aparato de medição com Laser

5.3.4 Monitoramento dos deslocamentos relativos entre as paredes do compartimento de armazenamento do stop-log

5.3.4.1 Concepção

A inspeção visual no compartimento de armazenamento dos painéis de vedação revelou grande quantidade de fissuras nas paredes, ilustrado na Figura 31, localizada no item 5.1.

A preocupação com o travamento na movimentação dos painéis de vedação se repete, sendo este parecido com o caso de monitoramento dos muros guia da grade, onde as dificuldades são idênticas. Sendo assim, as alternativas citadas no item anterior são válidas para este estudo, bem como a solução encontrada.

A exemplo do aparato de medição desenvolvido para o monitoramento dos deslocamentos relativos entre os muros guia da grade, foi utilizado outro aparato, com os mesmos princípios de funcionamento. Porém, o equipamento medidor de deslocamentos laser, utilizado no primeiro, foi substituído por um sensor indutivo do tipo LVDT. Isto foi feito como forma de verificar outros equipamentos aplicáveis a este tipo de medição e por ser este projeto inserido em um projeto de P&D, que busca, entre outras coisas, novas alternativas de medição, aplicáveis a outros empreendimentos.

5.3.4.2 Características do LVDT

O LVDT utilizado para o monitoramento dos deslocamentos relativos entre paredes é do fabricante Micro-Epsilon, série LVP, modelo LVP-50, cujas principais características estão resumidas no Quadro 4. A Figura 82 traz um croqui do equipamento com as respectivas dimensões.

O LVDT LVP-50 é um modelo que possui núcleo solto e deve ser fixo no local de referência da leitura (no caso, a parede do compartimento de armazenamento dos painéis de vedação). Isto é um inconveniente para a aplicação requerida, pois as paredes podem ter deslocamentos diferenciais na vertical ou outras direções, podendo danificar o aparelho. Esta característica pôde ser observada após a chegada do equipamento, que é importado.

A aquisição de outro LVDT com núcleo preso por molas, que permite que este fique somente em contato com o local da leitura, foi inviabilizada pelo prazo para aquisição e fornecimento. Adaptações permitiram o aproveitamento do mesmo LVDT.

Estudos e testes realizados por técnico especialista em eletrônica do LCEC levaram à utilização de uma capa de acrílico revestindo o corpo do LVDT e uma mola na superfície, presa ao núcleo solto. O LVDT original e as modificações podem ser visualizados nas Figuras 83 e 84, respectivamente. A mola utilizada foi fabricada especialmente para esta finalidade em empresa especializada da região de Ilha Solteira. O material de fabricação foi o aço inox.

Esse equipamento transmite informações de saída em corrente elétrica, proporcionais aos deslocamentos ocorridos. A exemplo do sensor laser, o LVDT transmite as informações das leituras para o mesmo sistema de aquisição de dados. Este sensor permite um campo de medida de ± 25 mm, onde o sinal negativo (-) corresponde ao afastamento entre as paredes e o sinal positivo (+) à aproximação, determinados pelo mesmo software de gerenciamento das leituras de deslocamentos.

Quadro 4: Principais características do LVDT

Campo de medida (CM)	50 mm
Linearidade	0,125 mm
Resolução	0,015 mm
Campo de temperatura	-45°C a +85°C

Fonte: Adaptado de Micro-Epsilon (2007b)

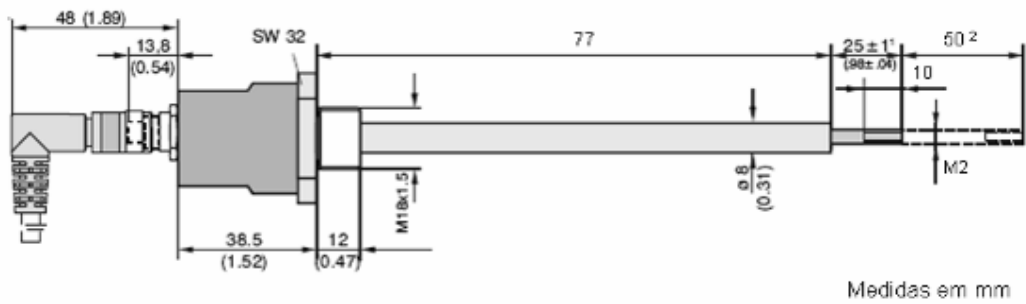


Figura 82: Croqui do LVDT, modelo LVP-50
Fonte: Adaptado de Micro-Epsilon (2007b)

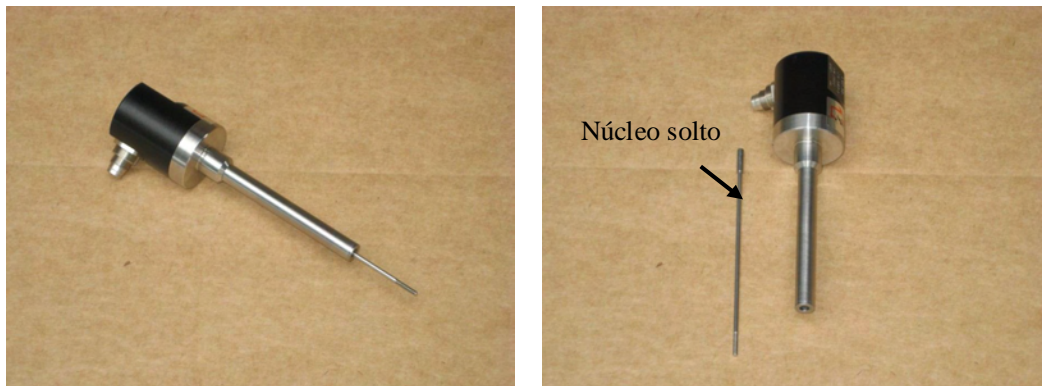


Figura 83: Sensor indutivo LVDT

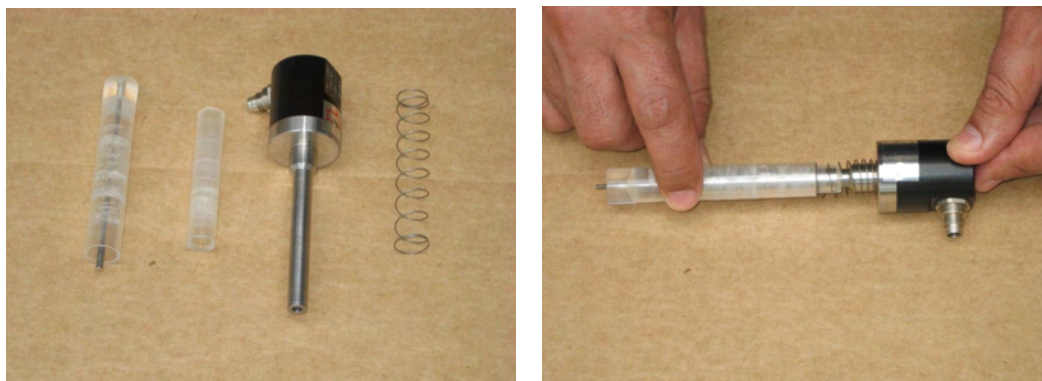


Figura 84: LVDT com adaptações

5.3.4.3 Particularidades do aparato de medição

A concepção do aparato de medição com LVDT seguiu os mesmos cuidados e possui a mesma sistemática de medição do aparato com laser.

O cálculo da dilatação térmica linear é realizado conforme a fórmula (1), assim como os deslocamentos relativos das paredes são fornecidos pela fórmula (3). O que muda é o deslocamento total real (L_t), que é dado pela fórmula (4). O LVDT possui um dispositivo de ajuste para ficar posicionado próximo ao zero, permitindo que o campo de medida não seja comprometido. Na instalação do LVDT no local, este ficou deslocado de $-0,76$ mm. A fórmula (4) corrige o posicionamento do LVDT e fornece o deslocamento real medido. A distância do ponto de fixação do equipamento até o ponto de engaste da barra de invar (L_o) é de 4846 mm.

$$L_t = L_{lvdt} + 0,76 \quad (4)$$

Sendo:

L_t – deslocamento total.

L_{lvdt} (ou D2) – Leitura do LVDT.

Existem três termômetros com sistema integrado, realizando o monitoramento da temperatura na barra de invar no instante da medida de deslocamento. A medida inicial da temperatura (T_0) foi de $19,3^\circ\text{C}$, obtida pela média dos sensores.

As leituras de deslocamento e temperatura são transmitidas e armazenadas no sistema de aquisição de dados.

5.3.4.4 Detalhamento do aparato de medição

O aparato de medição está localizado no compartimento de armazenamento dos painéis de vedação e realiza as medidas de deslocamentos relativos de abertura e/ou fechamento entre as paredes.

A distância entre as paredes é de 5000 mm e o espaço para a instalação permitiu que a viga treliçada fosse projetada com comprimento de 4970 mm, para ficar distanciada 30 mm da parede de referência e seção transversal de 100 mm de largura e 250 mm de altura.

A barra de invar de seção transversal quadrada de $\frac{3}{4}$ " e comprimento de 4970 mm está apoiada sobre roletes na viga metálica. Os roletes possuem sistema de ajuste da altura e ranhuras para o direcionamento da barra. O projeto da viga metálica sofreu adaptações, motivadas pela utilização do equipamento de leitura. As principais foram: retirar a cantoneira superior do apoio móvel e inserir pontos de apoio intermediários. A Figura 85 mostra o projeto real da viga metálica treliçada e o aparato de medição com as modificações efetuadas.

Para a fixação na parede, a viga metálica treliçada recebe duas cantoneiras soldadas na face superior e inferior de uma das extremidades. A extremidade livre se apóia em um rolete sobre cantoneira, fixa na outra parede. Há três pontos de apoio intermediários com roletes sobre cantoneiras, para evitar flechas elevadas no meio do vão e fornecer estabilidade. Nesta viga não há cantoneira guia na extremidade livre, pois a largura da seção transversal é maior e, portanto, mais estável. Não existem pontos de contraventamento, pois está em local protegido.

Uma imagem dos roletes e do aparato em confecção está na Figura 86.

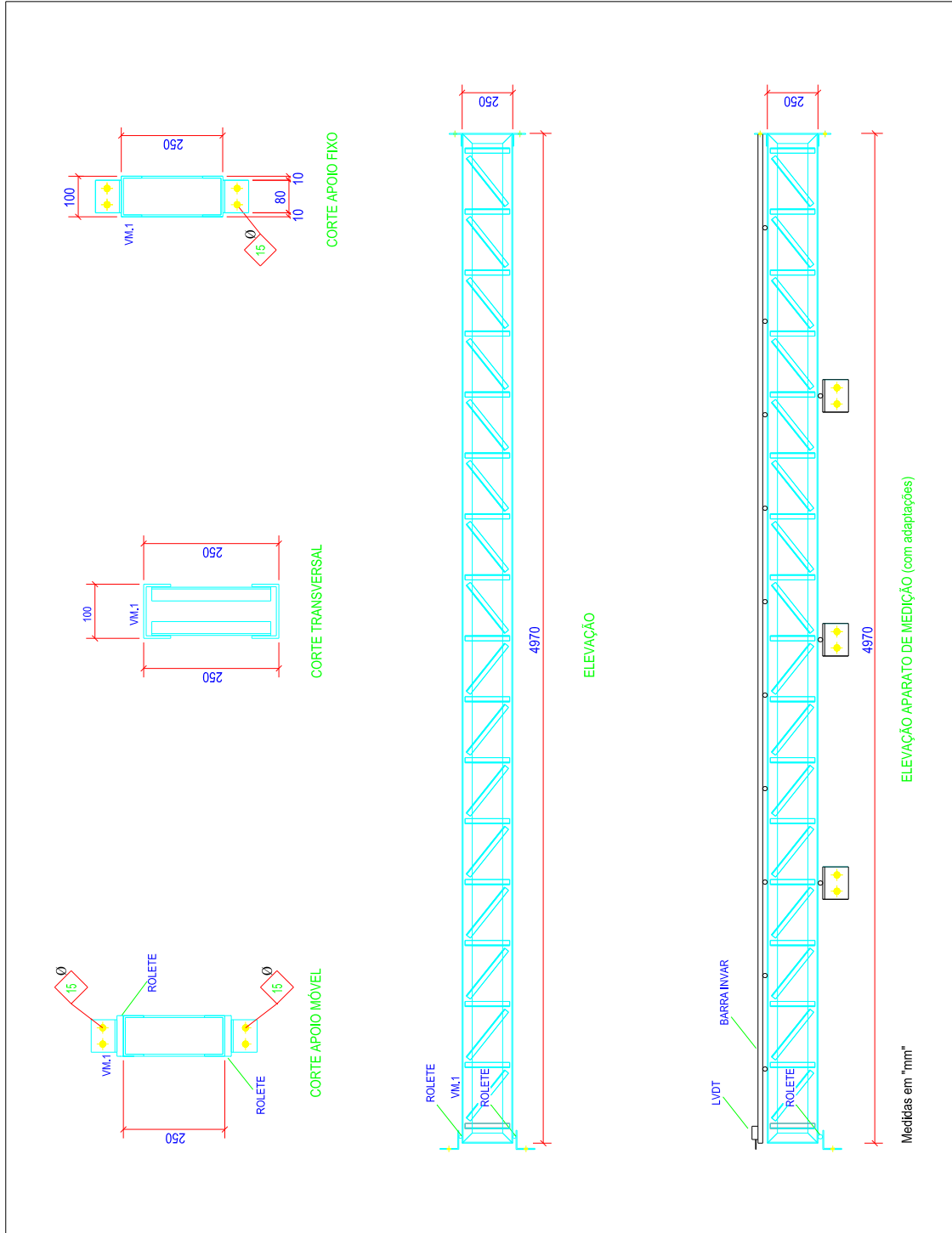


Figura 85: Projeto da viga metálica e aparato de medição - LVDT

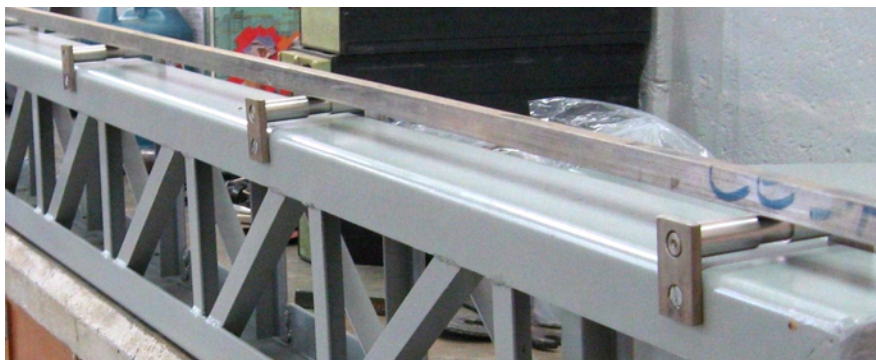


Figura 86: Detalhe do rolete do aparato de medição com LVDT e barra de invar sobreposta

5.3.4.5 Instalação do aparato de medição

O aparato de medição com LVDT foi instalado em altura correspondente ao aparato de medição com laser, ou seja, a superfície do invar está a uma distância de 2,00 m da laje.

A extremidade engastada ficou na parede VI e a extremidade apoiada em rolete está próxima à parede VII. Esta convenção foi adotada em função dos comprimentos de cabo dos sensores, estando com caminhamento mais curto com esta configuração. O croqui da Figura 87 mostra os locais das instalações dos aparatos de medição com laser e LVDT e do sistema de aquisição de dados.

Uma chapa de alumínio foi colocada no local de contato do LVDT com a superfície da parede VII para evitar atrito entre o equipamento e o concreto.

A viga metálica treliçada foi transportada em duas partes e soldada no local.

A extremidade engastada foi fixa à parede por intermédio de chumbadores. Os apoios intermediários estão ligados à parede I.

Os painéis de vedação que estavam no local foram utilizados como apoio para realizar as instalações. Um andaime suspenso suportado pela ponte rolante também foi empregado.

O aparato de medição com LVDT está em local protegido das intempéries, o que permitiu a colocação de proteções metálicas somente na região dos sensores de temperatura e deslocamento.

A Figura 88 ilustra a sequência de instalação do aparato de medição com LVDT, evidenciando o local de instalação e a colocação do LVDT.

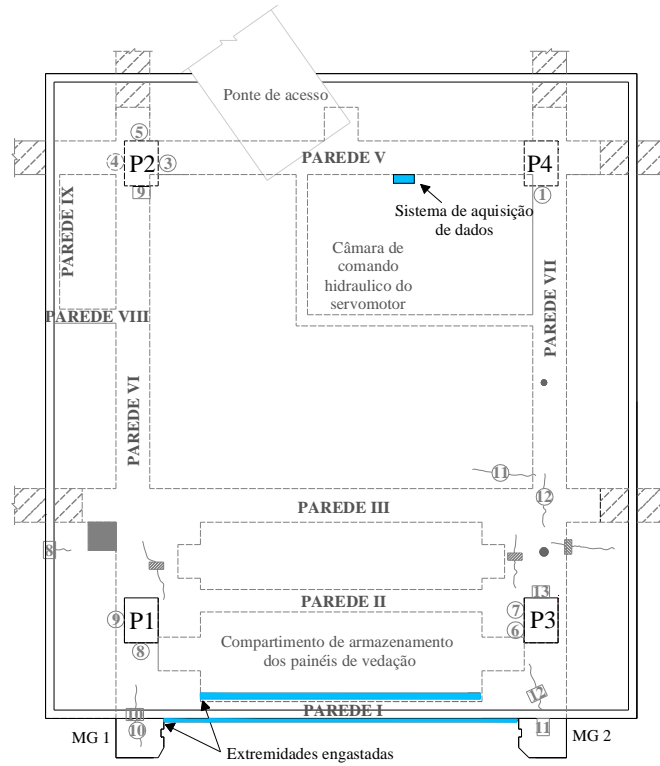


Figura 87: Localização dos aparatos de medição e sistema de aquisição de dados



(a) Local de instalação do aparato com LVDT



(b) Posicionamento da viga e barra de invar



(c) Extremidade engastada



(d) LVDT fixo na barra invar

Figura 88: Instalação do aparato de medição com LVDT

5.3.4.6 Medição da temperatura na barra de invar

Os sensores com as proteções foram colocados em furos transversais realizados na barra de invar, igualmente espaçados a cada 1200 mm. A Figura 89 traz uma esquematização da barra de invar com as posições e as denominações dos sensores de temperatura e do LVDT e a Figura 90 ilustra fotos do termômetro na barra e a proteção metálica localizada.

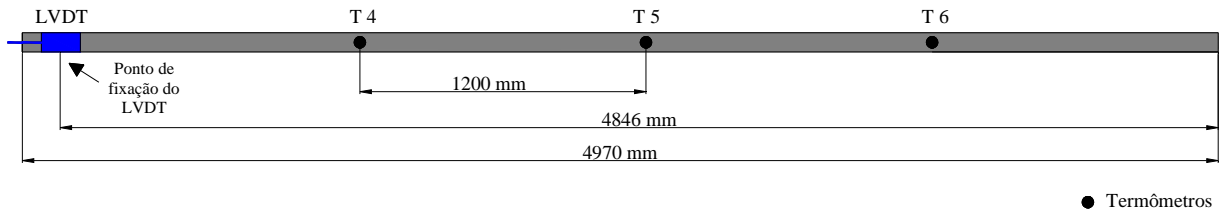


Figura 89: Posicionamento e denominação dos termômetros do aparato de medição com LVDT



Figura 90: Termômetro instalado na barra de invar

5.3.5 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é constituído, basicamente, por fonte, módulo de expansão, interface homem/máquina, memória e controlador lógico programável (CLP), como mostrado na Figura 91. Um CLP pode exercer várias funções para as quais é dimensionado, permitindo que atividades simples possam ser realizadas por meio de software de gerenciamento.

Os sensores utilizados nas medições de deslocamentos e temperatura estão interligados ao mesmo sistema de aquisição de dados e possuem software específico para o gerenciamento e armazenamento das leituras, permitindo que estas sejam automatizadas. Os dados são

armazenados em arquivos formatados de forma a possibilitar a abertura em aplicativos editores de planilhas.

O programa para automatização das leituras foi elaborado por técnico especialista no assunto, o mesmo que forneceu o sistema de aquisição de dados, com as características desejáveis a ele repassadas. Para a elaboração deste software foi determinado que a metade do campo de medida dos sensores de deslocamento é correspondente ao deslocamento zero, sendo assim, estes permitem um campo de medida de ± 25 mm. O sinal negativo (-) corresponde aos deslocamentos no sentido de afastamento relativo dos muros e paredes e o sinal positivo (+) indica aproximação destes. Todas as leituras estão programadas para serem realizadas cinco vezes ao dia, com o intuito de observar a diferença dos deslocamentos com a temperatura do concreto, que varia com a incidência solar e a temperatura ambiente. Os horários escolhidos foram: 0h00, 6h00, 12h00, 15h00 e 18h00.

Os dados que ficam armazenados na memória do sistema são de deslocamentos, medidos pelo Laser e LVDT, e seis informações de temperatura, três de cada barra de invar. A Figura 92 ilustra como os dados são organizados em planilha de Excel, ao serem retirados do sistema. As denominações D1, T1, T2 e T3 são correspondentes às leituras de deslocamento e temperaturas, respectivamente, do aparato de medição com laser (externo) e D2, T4, T5 e T6 são do aparato de medição com LVDT (interno).

Os componentes do sistema de aquisição de dados foram armazenados em uma caixa metálica para organização e proteção e está localizado em um compartimento da tomada d'água chamado câmara de comando hidráulico do servomotor (este local pode ser visualizado na Figura 87), protegido das ações climáticas. Regularmente os dados das leituras, que estão armazenados na memória do sistema, são retirados por meio de um laptop que é levado ao local.

Fotos dos testes realizados no sistema de aquisição de dados com os sensores e no descarregamento e abertura dos dados no aplicativo Excel estão na Figura 93. A Figura 94 demonstra o sistema de aquisição de dados em campo.

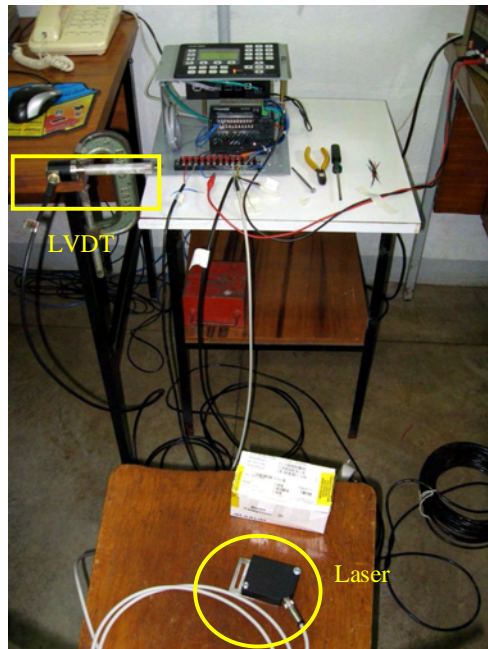


Figura 91: Componentes do sistema de aquisição de dados

Pasta3 - Microsoft Excel uso não comer

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Date	Time	Coleta_D1	Coleta_T1	Coleta_T2	Coleta_T3	Coleta_D2	Coleta_T4	Coleta_T5	Coleta_T6	
2	25/08/2009	00:00:00	- 0.12	18.0	18.0	17.7	- 0.73	19.1	19.2	19.2	
3	25/08/2009	06:00:00	- 0.12	17.7	17.7	17.4	- 0.73	18.9	18.9	18.9	
4	25/08/2009	12:00:00	0.05	22.2	21.7	20.8	- 0.74	19.2	19.2	19.1	
5	25/08/2009	15:00:00	0.06	23.1	22.1	21.1	- 0.76	19.6	19.6	19.5	
6	25/08/2009	18:00:00	0.01	19.5	19.3	18.7	- 0.76	19.5	19.5	19.4	
7											

Figura 92: Leituras retiradas do sistema de aquisição de dados, abertas em Excel

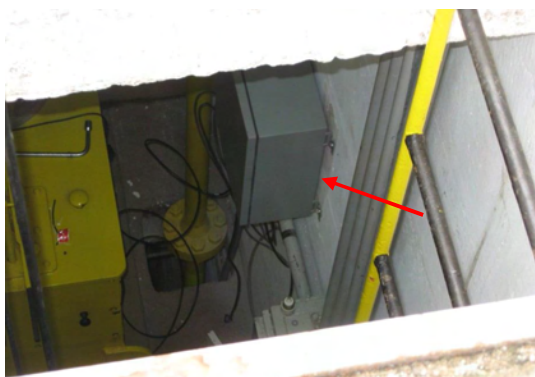


(a) Sistema de aquisição de dados em teste com sensores



(b) Teste de descarregamento dos dados em computador

Figura 93: Testes nos equipamentos



(a) Caixa metálica com o sistema de aquisição de dados. Vista da entrada do local



(b) Sistema de aquisição de dados funcionando

Figura 94: Sistema de aquisição de dados em campo

5.4 PRIMEIRAS LEITURAS

5.4.1 Medidores triortogonais

A frequência de leituras dos medidores triortogonais para os dois primeiros meses foi, aproximadamente, de duas medições ao dia, posteriormente, semanais, seguindo com esta frequência até o período mostrado pelos gráficos. O período de leituras foi cadastrado no SICESP.

As Figuras 95 a 101 ilustram os gráficos de deslocamentos dos medidores triortogonais para o período, procedentes do SICESP.

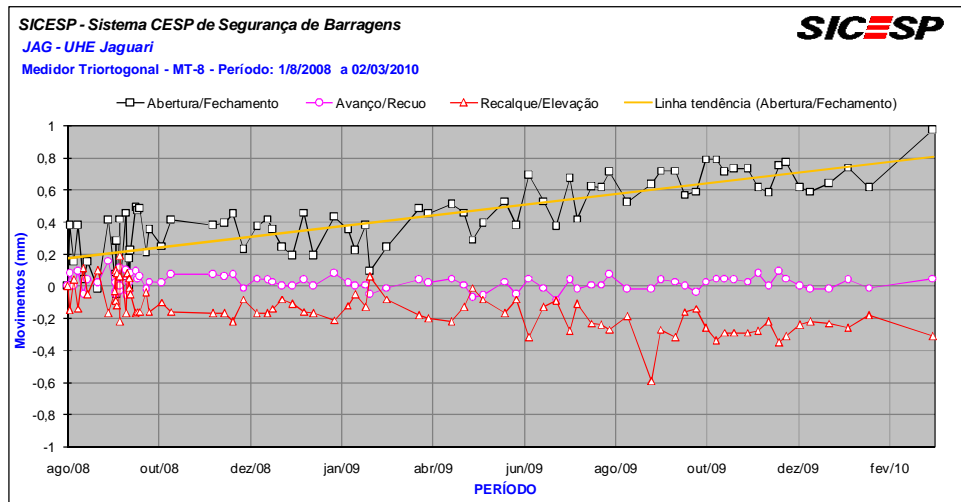


Figura 95: Deslocamentos medidos pelo MT-8

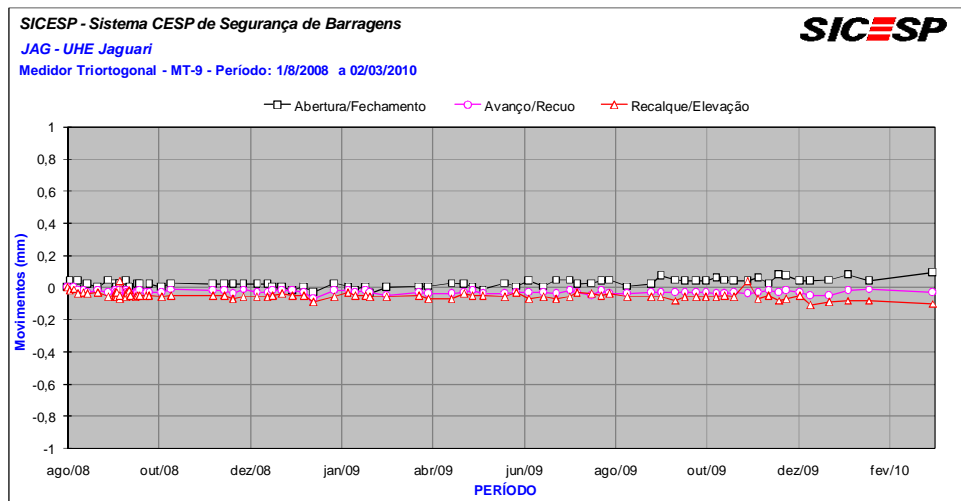


Figura 96: Deslocamentos medidos pelo MT-9

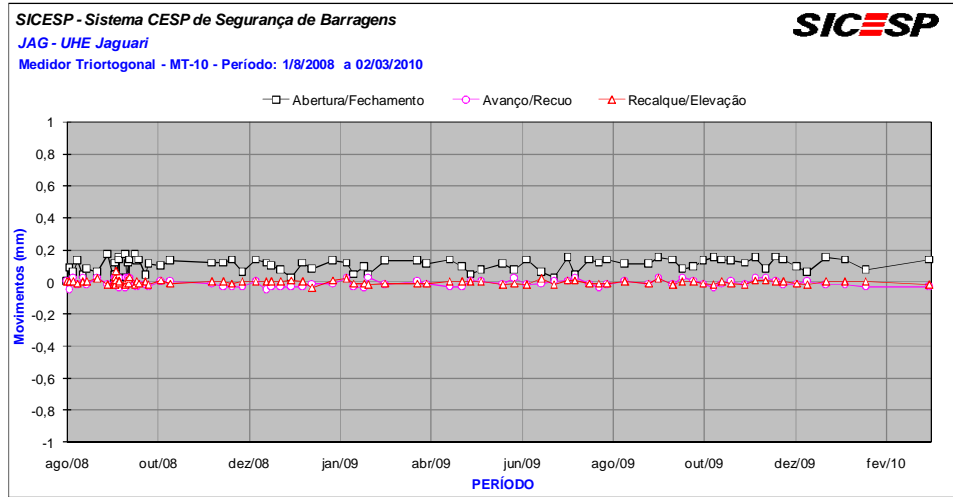


Figura 97: Deslocamentos medidos pelo MT-10

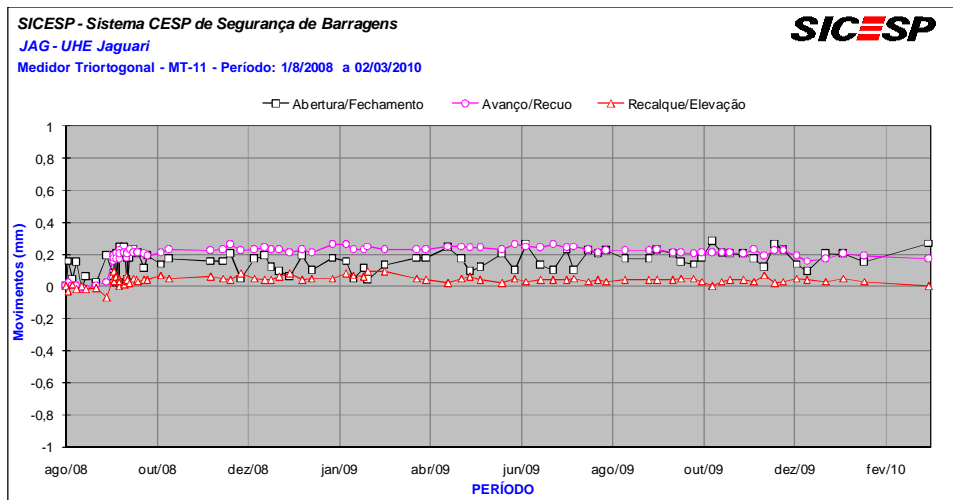


Figura 98: Deslocamentos medidos pelo MT-11

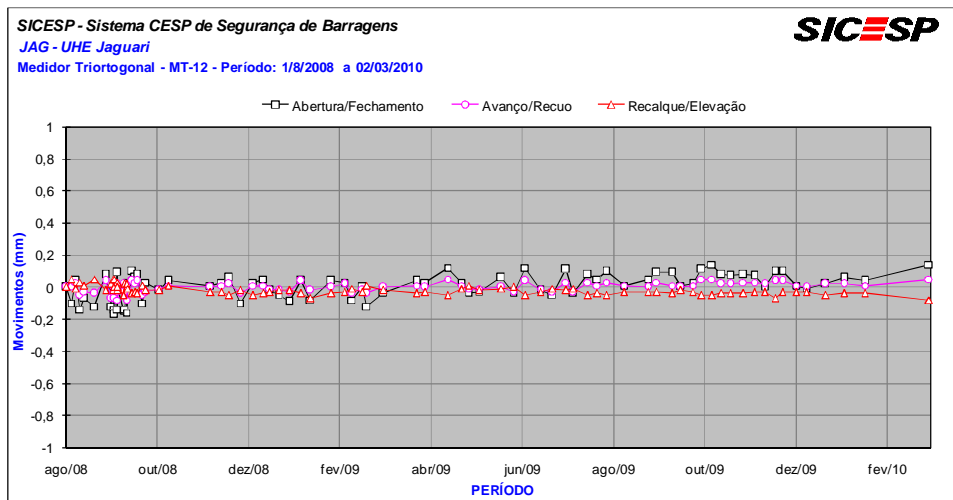


Figura 99: Deslocamentos medidos pelo MT-12

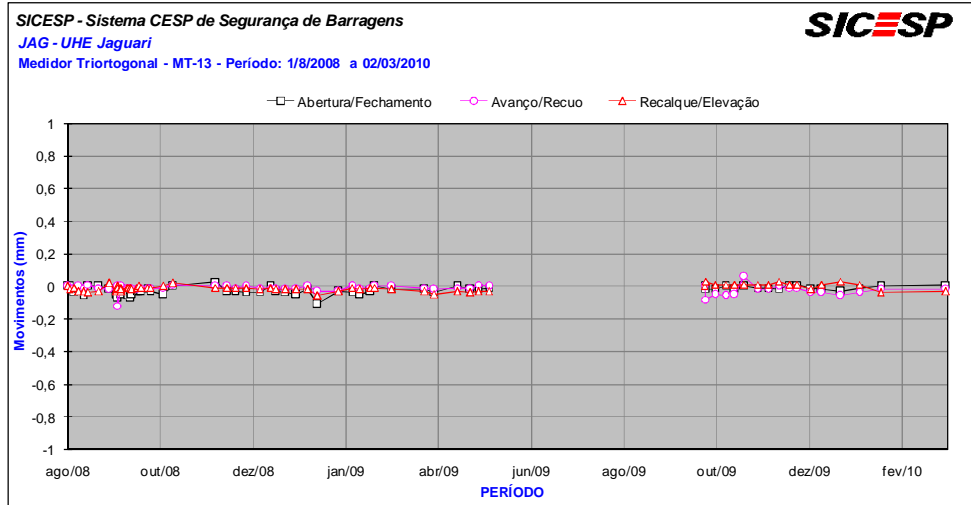


Figura 100: Deslocamentos medidos pelo MT-13

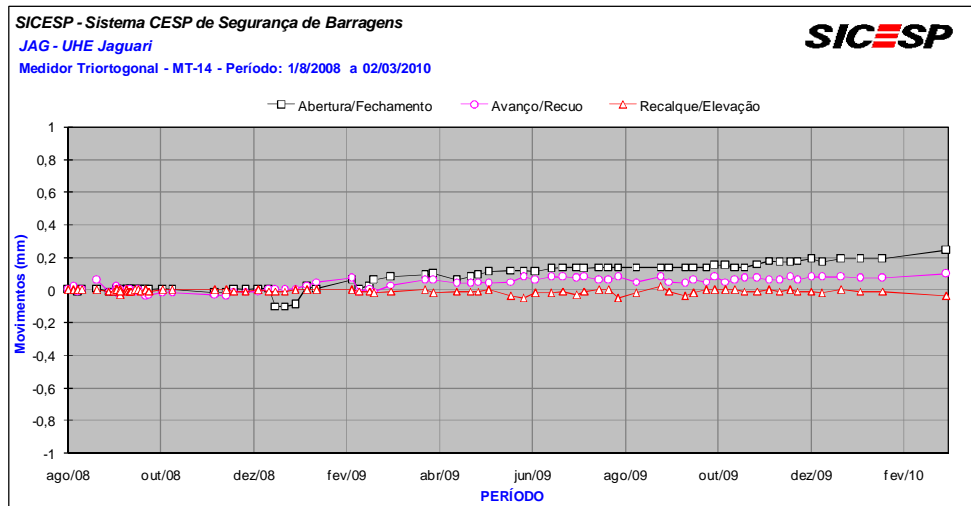


Figura 101: Deslocamentos medidos pelo MT-14

5.4.2 Bases para medição dos movimentos de fissuras

As leituras nas BT seguiram uma frequência de duas medições ao dia, no primeiro período de observação, posteriormente, passou a ser realizada uma medição por dia e, até o período mostrado pelos gráficos as leituras são semanais.

Todas as leituras das BT foram cadastradas no SICESP. Os gráficos de movimentos gerados neste sistema estão ilustrados nas Figuras 102 a 106.

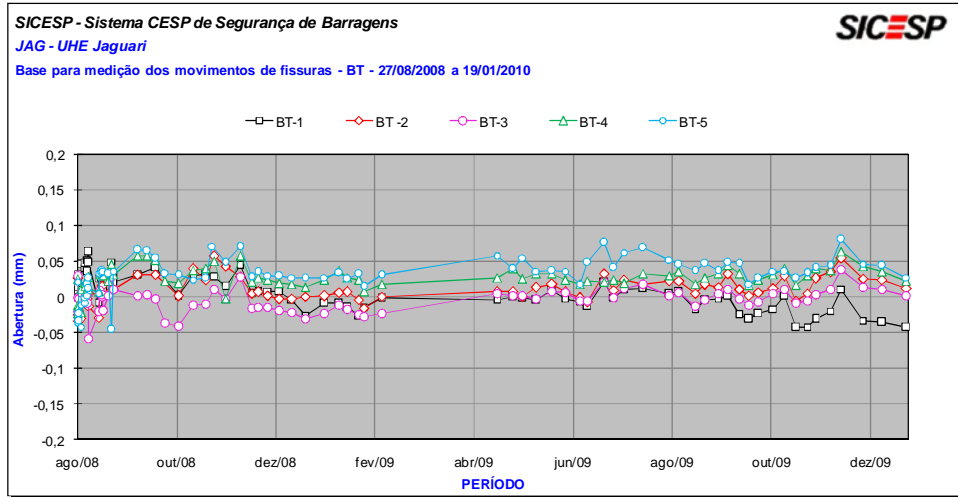


Figura 102: Deslocamentos medidos pelas BT-1, BT-2, BT-3, BT-4 e BT-5

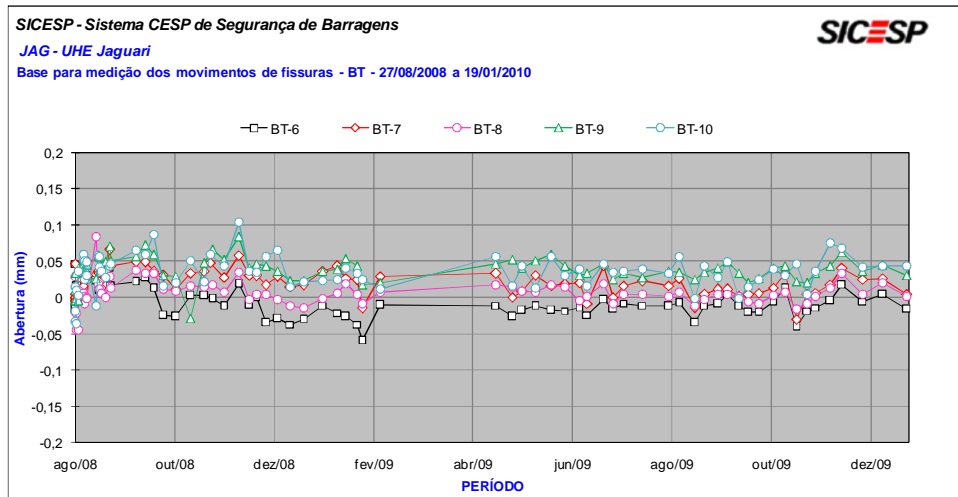


Figura 103: Deslocamentos medidos pelas BT-6, BT-7, BT-8, BT-9 e BT-10

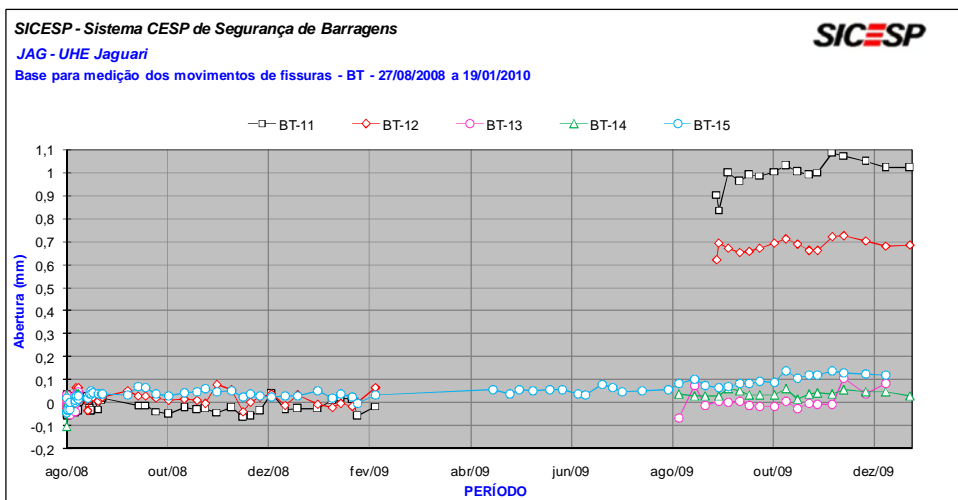


Figura 104: Deslocamentos medidos pelas BT-11, BT-12, BT-13, BT-14 e BT-15

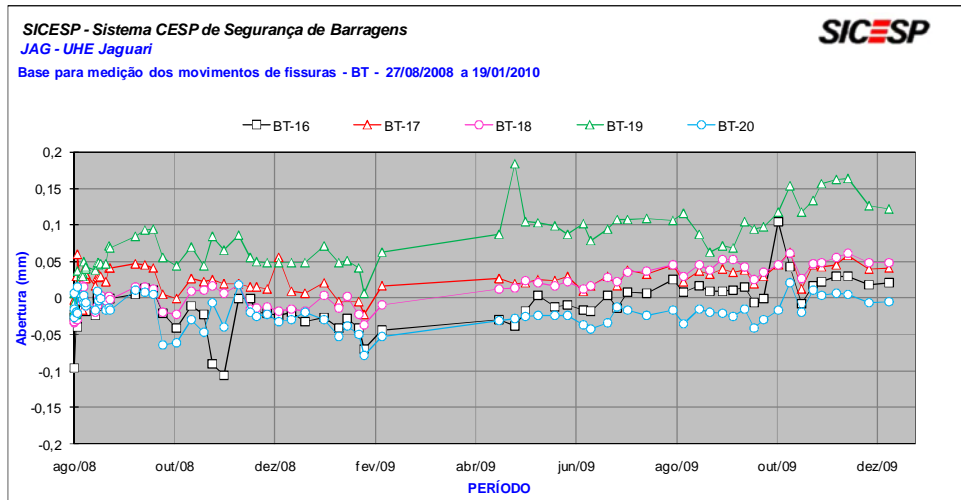


Figura 105: Deslocamentos medidos pelas BT-16, BT-17, BT-18, BT-19 e BT-20

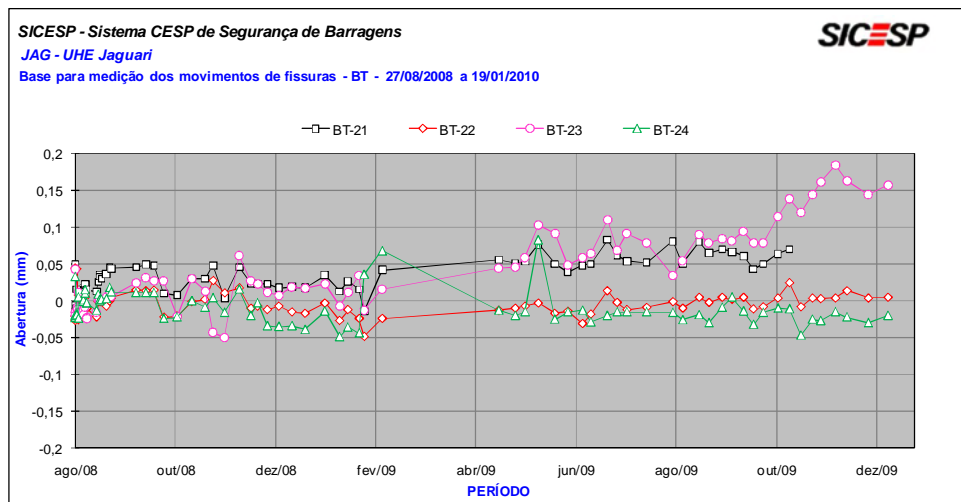


Figura 106: Deslocamentos medidos pelas BT-21, BT-22, BT-23 e BT-24

5.4.3 Extensômetros de Hastes

As leituras dos extensômetros de hastes foram realizadas diariamente nas duas primeiras semanas, posteriormente, a frequência foi semanal. Os dados não foram cadastrados no SICESP até a data mostrada pelos gráficos. As Figuras 107 a 110 trazem os deslocamentos verticais das regiões representadas pelas hastes e os deslocamentos das regiões localizadas entre as cotas de chumbamento destas, para o EH-1 e EH-2, respectivamente. Os gráficos permitem uma análise preliminar das leituras realizadas no período.

Os deslocamentos verticais entre as cotas de chumbamento das hastes estão mitigados dos efeitos de temperatura, uma vez que esta grandeza é obtida pela subtração entre os movimentos transmitidos pelas hastes.

Observação importante: As leituras realizadas nas hastes individualmente estão diminuindo em relação à de implantação, o que sugere que está havendo um afastamento entre a cabeça de leitura e o topo da haste. Como se trata de uma estrutura afetada pela reação álcali-agregado, o termo elevação está ligado à estrutura de concreto, assim como o recalque. Para padronizar a elevação como tendo sinal positivo e recalque, negativo, a subtração entre a leitura atual e a leitura de implantação foi invertida. Nas tabelas 6 e 7, localizadas no apêndice B, estão as leituras realizadas no período e os deslocamentos calculados e mostrados nos gráficos, para o EH-1 e EH-2, respectivamente.

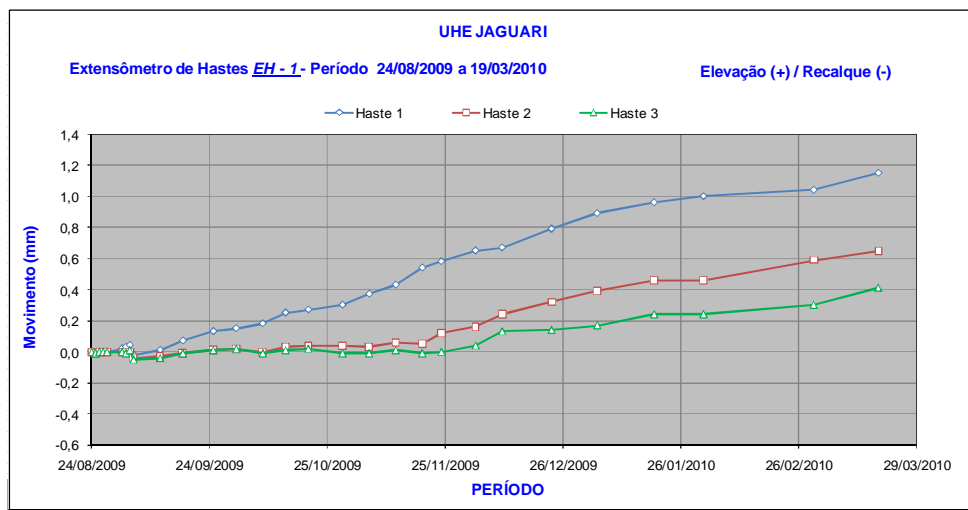


Figura 107: Deslocamentos das regiões representadas pelas hastes – EH – 1

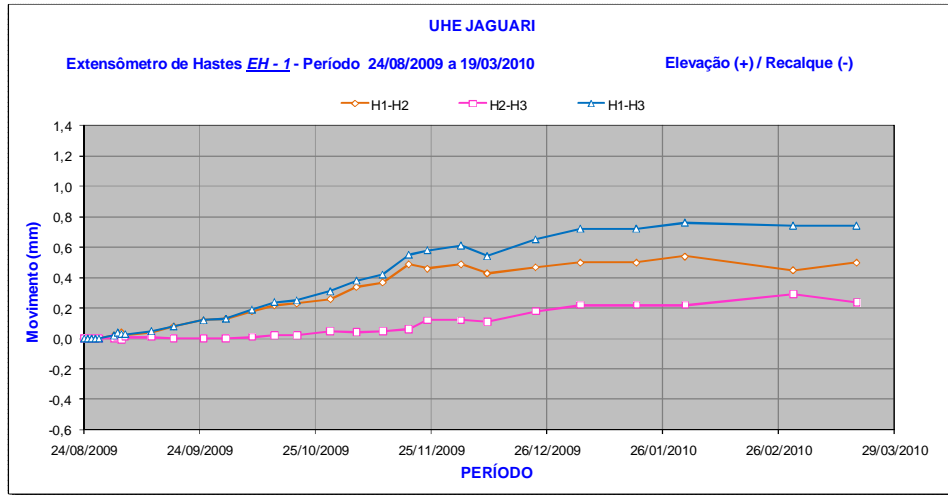


Figura 108: Deslocamentos das regiões entre as cotas de chumbamento das hastas – EH – 1

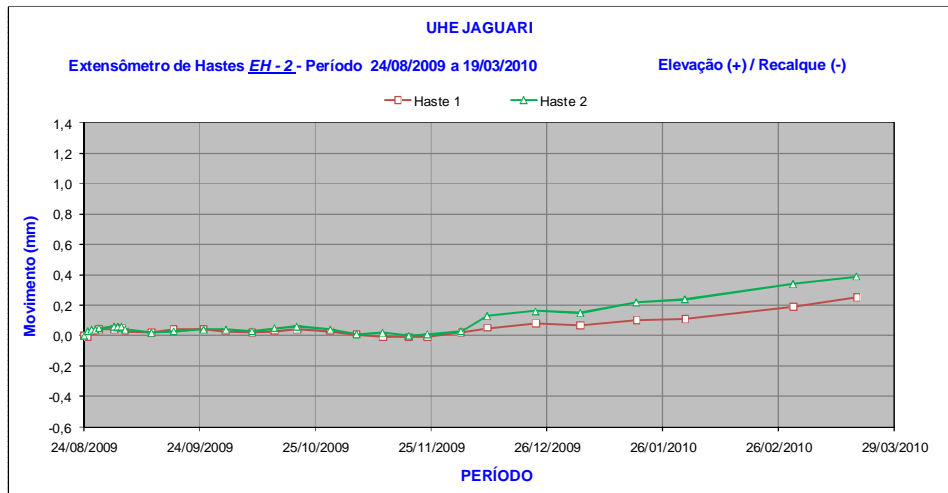


Figura 109: Deslocamentos das regiões representadas pelas hastas – EH – 2

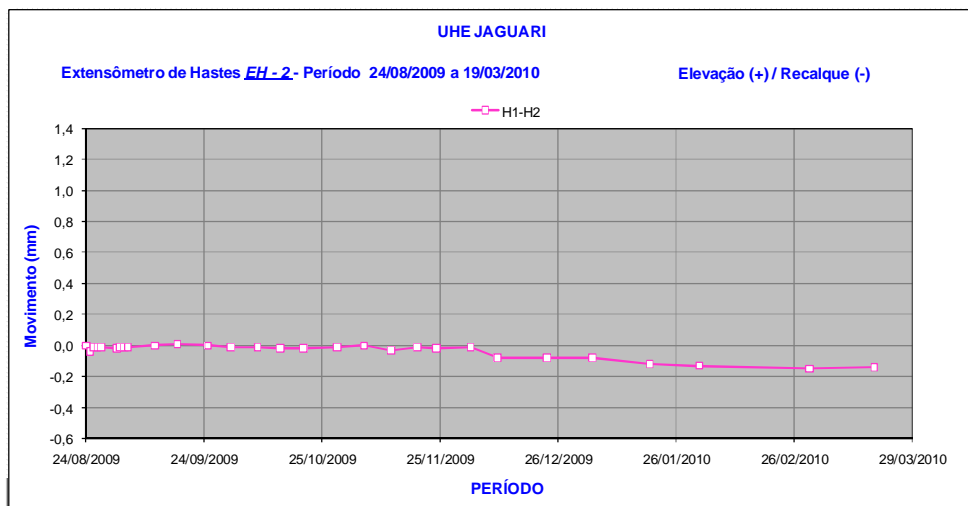


Figura 110: Deslocamento da região entre as cotas de chumbamento das hastas – EH - 2

5.4.4 Técnicas geodésicas de monitoramento

As medições são realizadas pela equipe de topografia da CESP, locada em Ilha Solteira. Periodicamente acontecem campanhas para os levantamentos de todos os marcos localizados na área da usina. As leituras costumam ser mensais diante da normalidade do processo.

Os dados dos levantamentos topográficos não foram cadastrados no SICESP até o momento, mas os movimentos medidos têm sido plotados em gráficos e observados pela equipe responsável.

Os gráficos de movimentos, fornecidos pela equipe de topografia, podem ser observados nas Figuras 111 a 114, que ilustram as movimentações verticais e horizontais para os quatro marcos superficiais da tomada d'água.

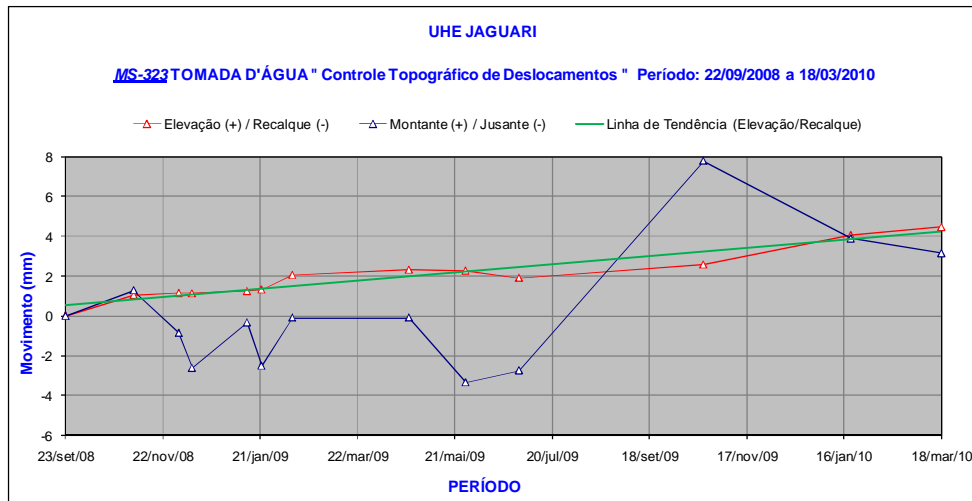


Figura 111: Deslocamentos do MS-323

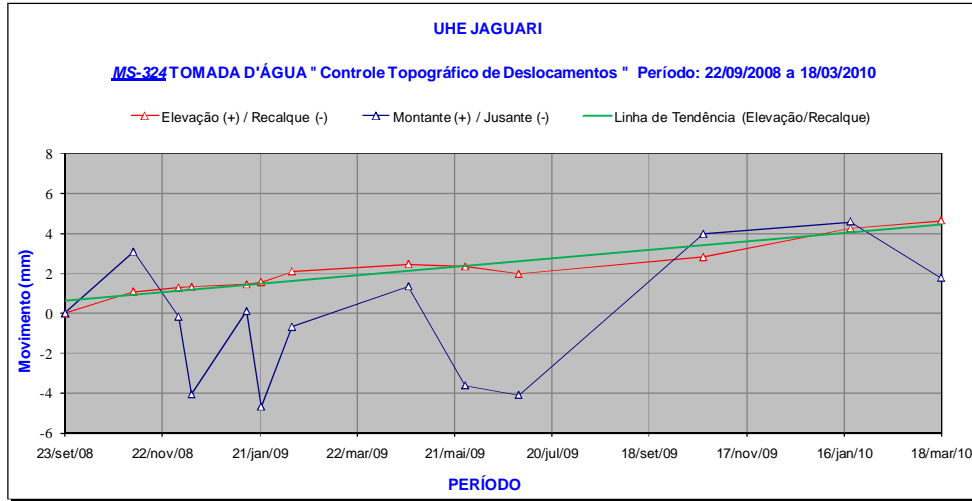


Figura 112: Deslocamentos do MS-324

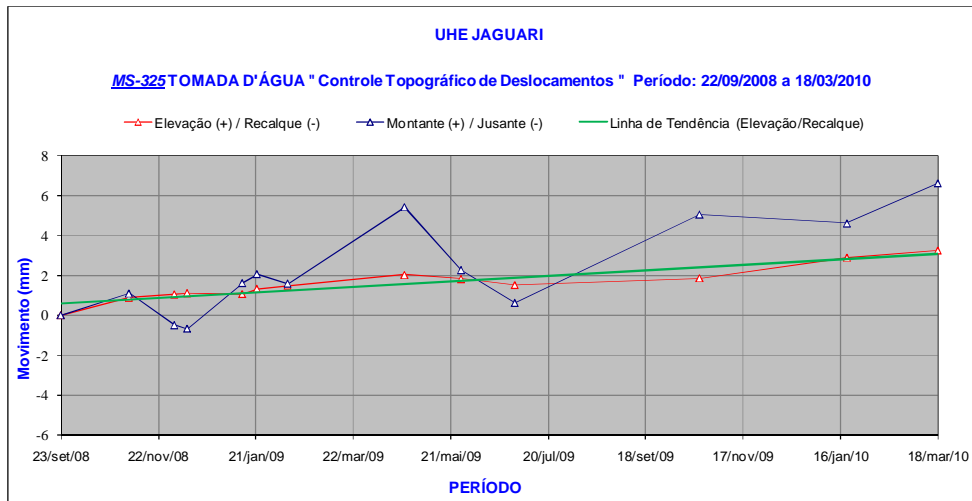


Figura 113: Deslocamentos do MS-325

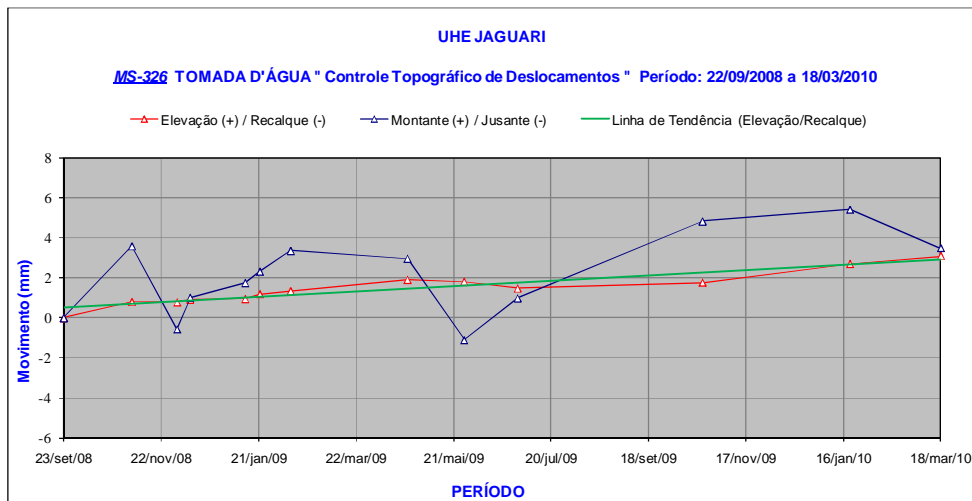


Figura 114: Deslocamentos do MS-326

5.4.5 Aparato de medição com Laser

As medidas têm sido realizadas cinco vezes ao dia: 0h00; 6h00; 12h00; 15h00 e 18h00. Para a montagem dos gráficos foram utilizadas as leituras correspondentes aos horários de maior e menor influência térmica no concreto, respectivamente 15h00 e 6h00. O horário de maior incidência solar se justifica para a verificação do movimento de abertura ou fechamento em período de expediente, onde uma possível intervenção para movimentação das peças pode ser realizada. Às 6h00 será possível verificar o efeito expansivo provocado pela reação tendo mitigados os efeitos térmicos do concreto e correlacioná-lo com os demais horários de medição.

Foram feitos gráficos de movimento x período, temperatura x período e temperatura x movimento para verificar a coerência das medidas realizadas pelo sensor e a influência térmica na movimentação do concreto. As Figuras 115 a 120 ilustram estes gráficos para 6h00 e 15h00, respectivamente. No apêndice B estão as tabelas 8 e 9, que trazem as leituras realizadas no período e os deslocamentos calculados para os dois horários apresentados.

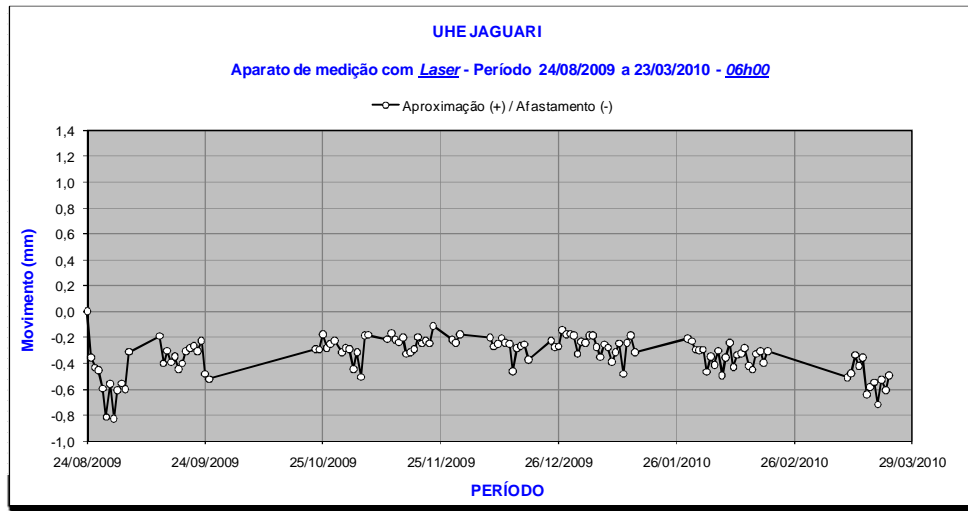


Figura 115: Movimento medido pelo Laser – 6h00

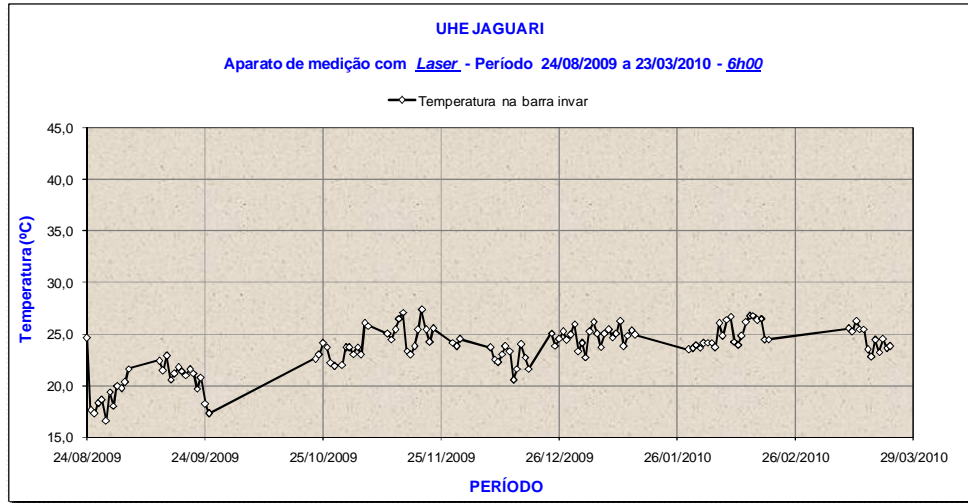


Figura 116: Correlação entre a temperatura e o período de observação – aparato com Laser - 6h00

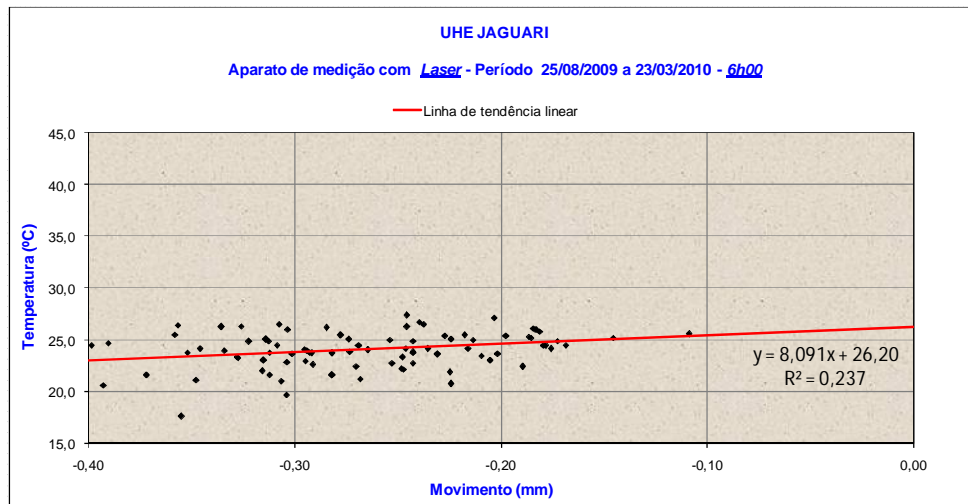


Figura 117: Correlação entre temperatura e movimento – aparato com Laser – 6h00

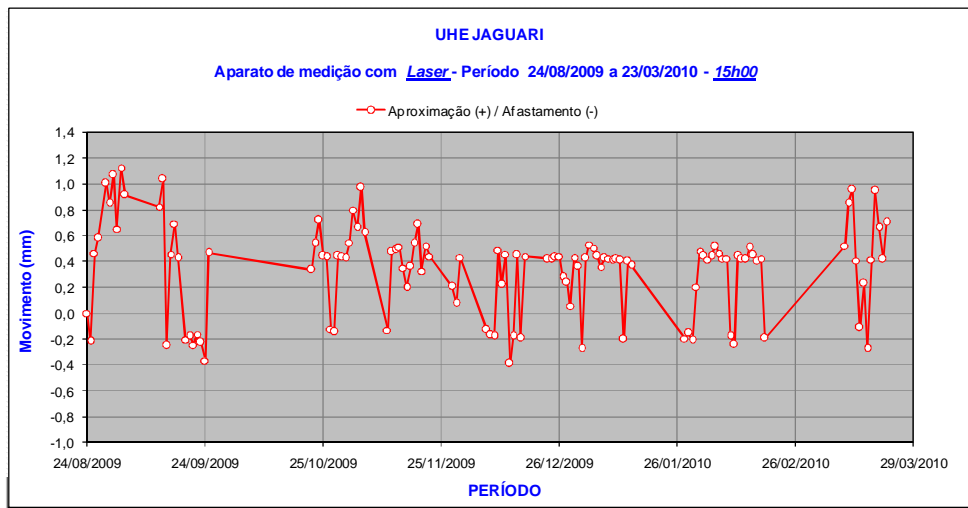


Figura 118: Movimento medido pelo Laser – 15h00

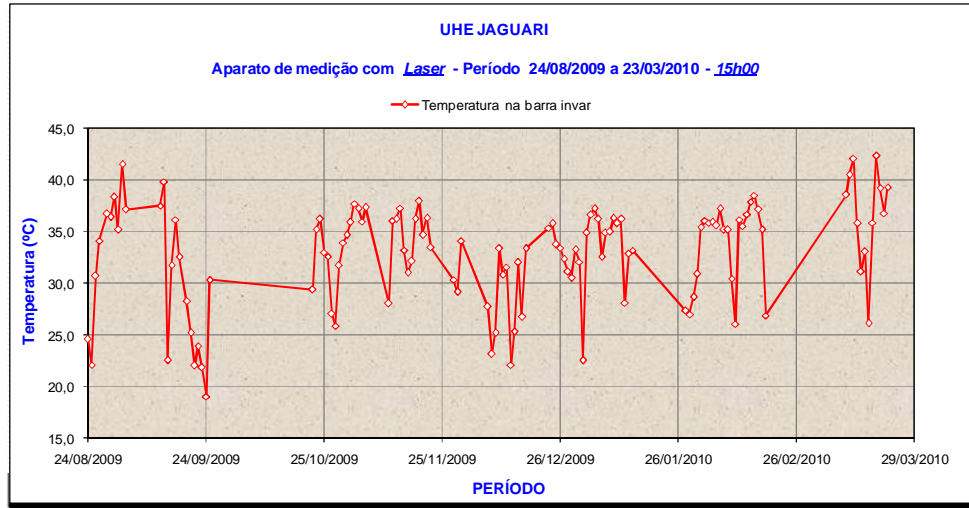


Figura 119: Correlação entre a temperatura e o período de observação – aparato com Laser - 15h00

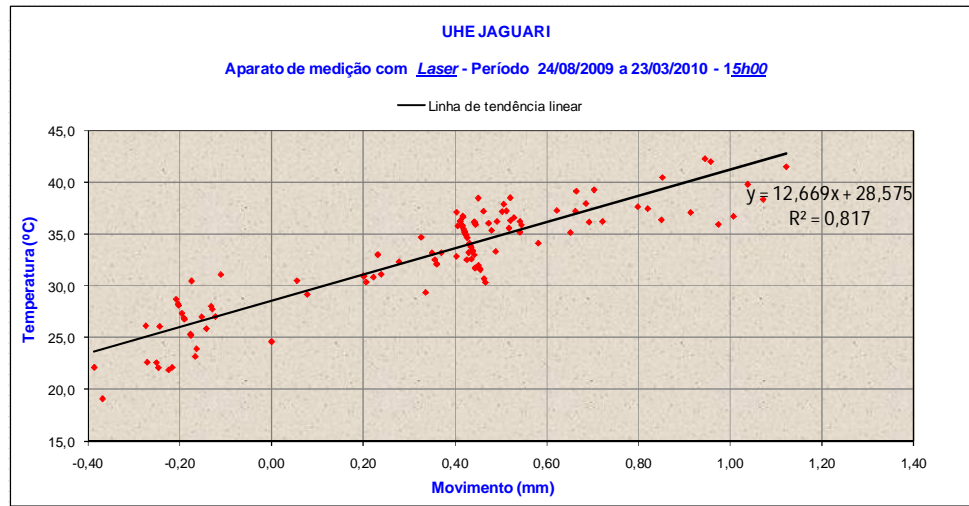


Figura 120: Correlação entre temperatura e movimento – aparato com Laser – 15h00

5.4.6 Aparato de medição com LVDT

A frequência de leituras é a mesma do aparato de medição do Laser, assim como os horários analisados, apesar do aparato de medição com LVDT estar protegido de ações climáticas e não apresentar variações elevadas de temperatura durante o dia. Os gráficos para análise das medições foram movimento x período, temperatura x período e temperatura x movimento para as duas temperaturas. As Figuras 121 a 126 ilustram estes gráficos para 6h00 e 15h00, respectivamente. As tabelas 10 e 11, localizadas no apêndice B, trazem as leituras e os deslocamentos calculados.

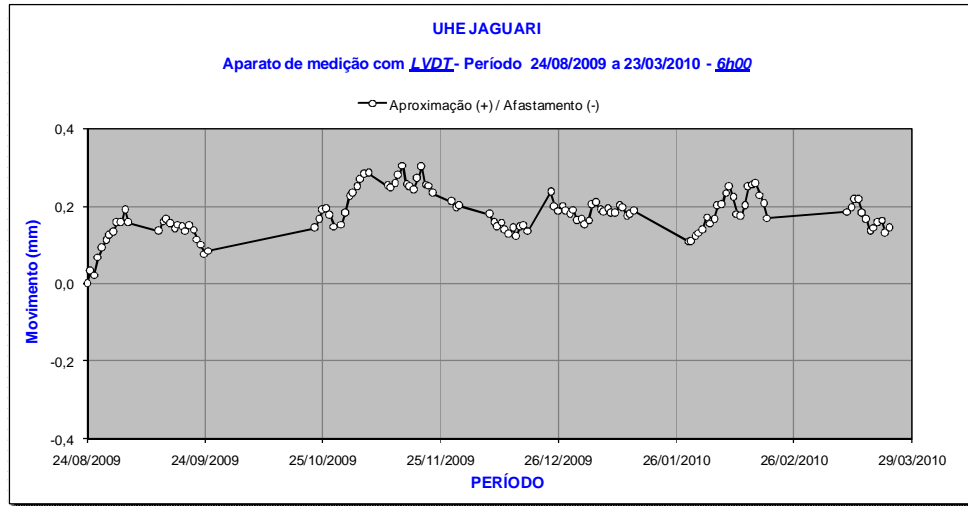


Figura 121: Movimento medido pelo LVDT – 6h00

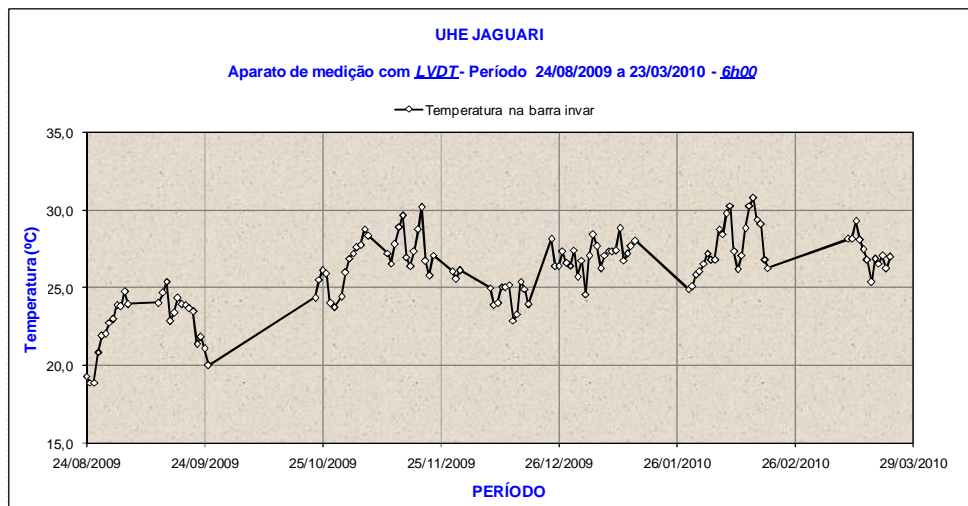


Figura 122: Correlação entre a temperatura e o período de observação – aparato com LVDT - 6h00

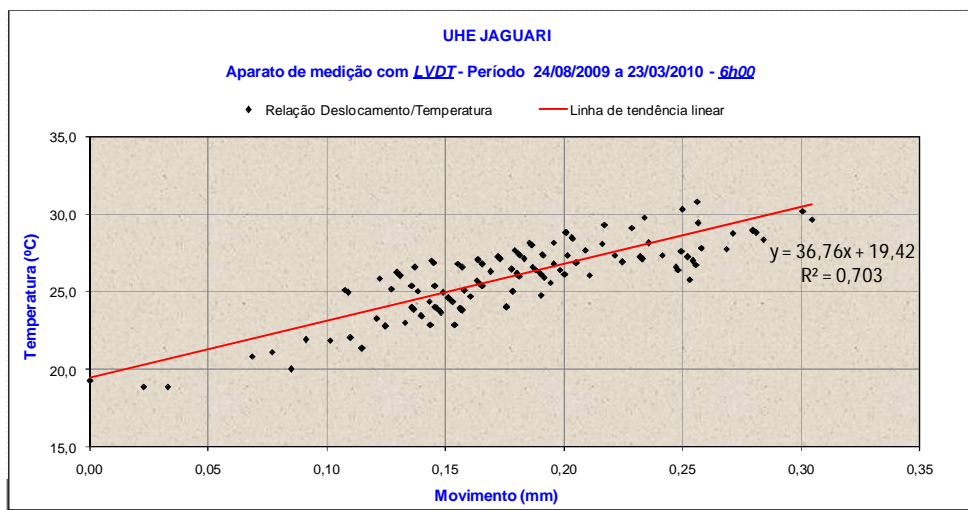


Figura 123: Correlação entre temperatura e movimento – aparato com LVDT – 6h00

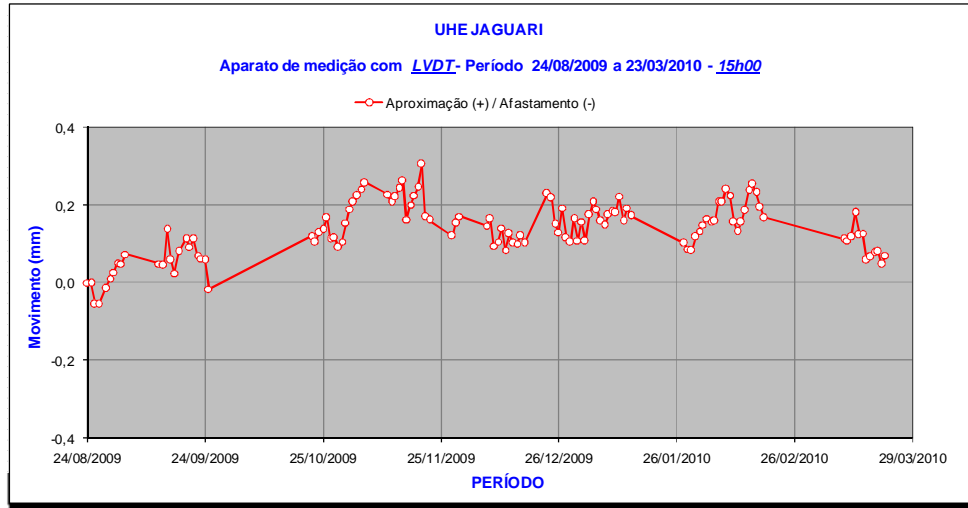


Figura 124: Movimento medido pelo LVDT – 15h00

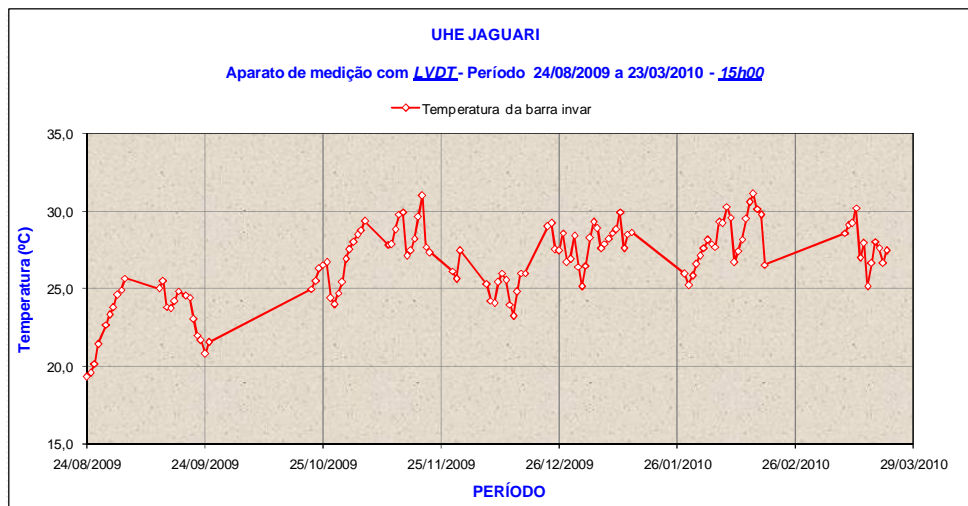


Figura 125: Correlação entre a temperatura e o período de observação – aparato com LVDT - 15h00

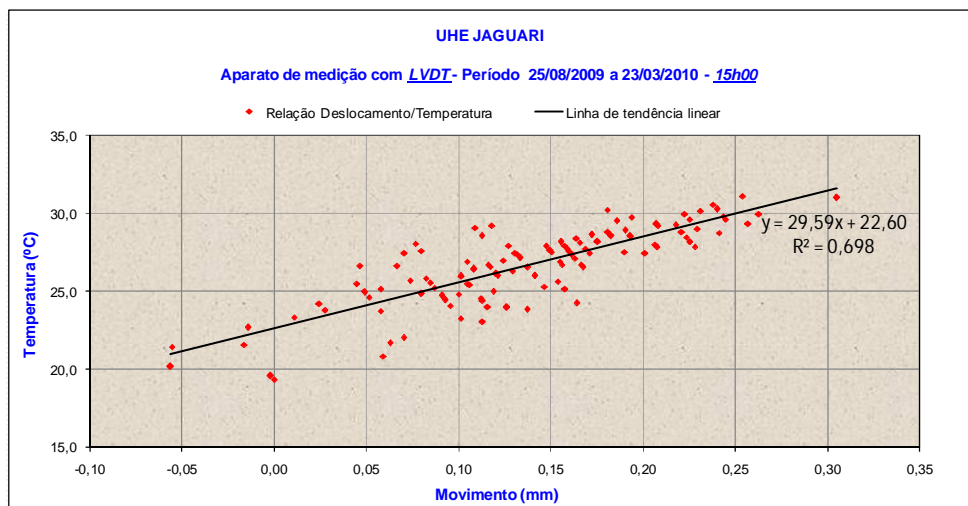


Figura 126: Correlação entre temperatura e movimento – aparato com LVDT – 15h00

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A instrumentação instalada na tomada d'água da UHE Jaguari permitirá uma ampla observação do seu comportamento estrutural. Uma análise que permita verificar eventuais deslocamentos residuais poderá ser realizada, após, ao menos doze meses de leituras, visto que neste período o concreto experimenta todas as variações climáticas oriundas das quatro estações do ano.

Para a tomada d'água da UHE Jaguari espera-se que os medidores de fissuras instalados registrem movimentos predominantemente de abertura e, em menor proporção, avanço/recuo e elevação/recalque para os MT. Para os EH, pelo observado em outras barragens afetadas pela reação, os movimentos dominantes são de elevação. O mesmo se estende às medições topográficas. Os aparatos de medição com Laser e LVDT devem mostrar uma tendência de movimento de abertura ou de fechamento.

Em relação aos tipos de equipamentos utilizados para o monitoramento, podem existir outros para as medições das mesmas grandezas, cabe à equipe técnica envolvida com o projeto de monitoramento determinar, com base em condições técnico-econômicas, o melhor instrumento ou a melhor técnica para cada aplicação.

✓ MT e BT

Os MT e BT são instrumentos comumente utilizados em medições de deslocamentos diferenciais entre blocos e têm tido amplo emprego em medições de fissuras surgidas em estruturas, principalmente em casos de concretos afetados pela RAA, pois permitem observar a evolução dos movimentos e, conseqüentemente, da expansão desenvolvida em decorrência do gel da reação.

Os medidores de fissuras, com dezenove meses de monitoramento, têm apresentado resultados coerentes com o esperado, que confirmam o sucesso das instalações. É possível observar uma tendência característica de abertura, para a maioria das fissuras monitoradas, sendo mais nítido naquelas que estão nas paredes internas e na laje. As fissuras monitoradas pelos MT têm apresentado maiores movimentações, visto que estas já se apresentam com maiores dimensões. As aberturas indicadas pelas BT foram da ordem de 0,1 mm, com nítida disposição ao crescimento para a maioria delas.

✓ EH e medições geodésicas

Os EH têm como função principal e original realizar medições de recalque de fundações no período de construção e enchimento do reservatório e ao longo da vida útil da barragem, assim como as medições topográficas, que permitem monitorar também deslocamentos horizontais. A mesma sistemática de instalação do EH é realizada em estruturas de concreto para o monitoramento de deslocamentos originários da RAA, o que tem fornecido bons resultados, sendo um dos principais instrumentos a serem instalados para o monitoramento do desenvolvimento da patologia. A instalação deste equipamento em barragens já construídas é relativamente dificultosa, envolvendo a execução de furos de sondagem no concreto para a maioria das ocasiões.

Na tomada d'água da UHE Jaguari, o extensômetro de haste nº 1 foi instalado em furo de sondagem com, aproximadamente, 64 m de profundidade, e com água até o nível do reservatório, o que dificultou os trabalhos de instalação. As borrachas de polietileno que revestiam as hastes tiveram que ser substituídas por tubos de PVC, pois estas não suportaram a pressão d'água no fundo do furo, de 50 m.c.a. aproximadamente. Em barragens onde já está prevista a instrumentação, as instalações acontecem simultâneas a construção da estrutura, o que facilita e problemas deste tipo não acontecem.

O monitoramento realizado pelos extensômetros de hastes durante sete meses têm indicado que pode estar havendo uma elevação do topo da estrutura, demonstrado pela haste 1 do EH-1, que está chumbada na rocha de fundação. Com base na Figura 107, com sete meses a leitura de deslocamento é de 1,2 mm, uma projeção dos deslocamentos para um ano de monitoramento demonstra que este poderá ser de aproximadamente 2 mm, o que fornece uma taxa de expansão vertical anual para a estrutura em torno de 30×10^{-6} . Em se tratando de movimento de elevação, uma análise particular de cada haste e das regiões entre os pontos de chumbamento das hastes indica que a região localizada entre as hastes H1 e H2 do EH-1 é a responsável pela maior movimentação vertical da torre da tomada d'água.

As hastes do EH-2 apresentaram correspondência com o EH-1 até meados de novembro de 2009, após este período o movimento da haste que está na superfície (H2) está mais acentuado em relação à haste H1. Neste mesmo período as movimentações do EH-1 foram mais acentuadas, no entanto, as temperaturas ambientais também aumentaram devido à estação do ano. Uma análise com no mínimo um ano de monitoramento fornecerá resultados mais conclusivos.

Pelo que se observa nos dados de deslocamentos verticais indicados pelas medições topográficas, após dezoito meses de monitoramento, houve uma movimentação de elevação da estrutura de 4 mm para os quatro MS, ou seja, todas as extremidades representadas da tomada d'água mostram o mesmo comportamento. Este movimento confirma a hipótese de que os movimentos medidos pelos EH sejam de elevação da estrutura e, com um ano de medida nos marcos superficiais, os deslocamentos são de cerca de 2 mm, o que vem de encontro com os valores estimados de deslocamento e taxa de expansão vertical anual. O movimento horizontal sentido montante/jusante do MS-325, aparentemente está voltado para a montante, com ordem de grandeza de 6 mm. Os demais MS apresentam movimentos horizontais oscilatórios em torno da origem.

✓ Aparatos de medições com Laser e LVDT e sistema de aquisição de dados

Equipamentos do tipo Laser e LVDT têm seu uso mais restrito a realizações de controle de qualidade em indústrias e a medições de pequenos deslocamentos em ensaios estruturais de materiais, respectivamente. Os usos do Laser e do LVDT para as medições em campo na UHE Jaguari foram adaptados a aparatos de sustentação e a um sistema de aquisição de dados com automatização das leituras, em virtude das exigências caracterizadas pela necessidade e local de monitoramento. As instalações dos aparatos ocorreram na normalidade do que foi previsto.

Após as instalações foi possível observar que as leituras, que deviam ser armazenadas por longos períodos no sistema de aquisição de dados, estavam sendo apagadas após sete dias e os arquivos diários eram armazenados separadamente. Para a solução destes inconvenientes foram feitos ajustes no software de gerenciamento. Outro problema notado foi a falha de aquisição de algumas leituras que, segundo a equipe técnica especialista em eletrônica do LCEC, estava atribuído à falta de energia no local.

Semanalmente as leituras são retiradas do sistema de aquisição de dados, pois a configuração do aparato de medição e o sistema de automatização das leituras estão em análise para este tipo de problemática. Após a verificação de que tudo esteja na normalidade, sem necessidade de novos ajustes, o período para a retirada dos dados poderá ser maior.

Uma análise preliminar nos gráficos de movimento x período para os dois aparatos de medição indica que os movimentos relativos de aproximação (aproximação entre o aparelho de leitura e o alvo) acontecem, predominantemente, quando há elevadas temperaturas e vice versa, ou seja, há uma correlação linear entre movimento e temperatura, confirmado pelos

gráficos de temperatura x período e temperatura x movimento, já que o primeiro é praticamente correspondente ao gráfico de movimento x período e o segundo mostra nitidamente a correlação linear entre as grandezas, o que demonstra coerência nas leituras e sugere que os aparatos de medição têm funcionamento satisfatório.

No caso do aparato de medição com laser, que está instalado entre os muros guia da grade, há constantes oscilações motivadas pela direta incidência solar no concreto. Há grande diferença entre os movimentos do horário das 6h00 e os das 15h00, causada pela elevada variação de temperatura, chegando a variações diárias superiores a 15°C, pela medição na barra de invar.

O aparato de medição com LVDT está localizado em ambiente livre de abruptas variações ambientais. Os gráficos de movimentos relativos entre paredes para as duas temperaturas em análise, 6h00 e 15h00, são praticamente correspondentes, pois as variações diárias de temperatura, mostradas pelos termômetros fixados na barra de invar, são insignificantes. A análise dos resultados tem mostrado tendência à aproximação entre as paredes, no entanto, a temperatura também aumenta, em relação à de implantação. A constatação da existência de movimentos residuais poderá ocorrer com um período de pelo menos um ano de observação.

7 CONCLUSÕES

A tomada d'água da UHE Jaguari ainda não apresenta problemas operacionais e com a segurança estrutural. No entanto, o próprio diagnóstico da RAA, aliado às observações visuais na estrutura e à verificação dos deslocamentos de algumas fissuras da laje evidenciaram a necessidade de complementação do monitoramento, frente aos efeitos expansivos que o concreto apresenta que, no futuro deverão vir a exigir a realização de reparos.

A gama de equipamentos instalados permitirá o monitoramento de inúmeros parâmetros importantes para conclusões acerca do comportamento da estrutura, pois na elaboração do projeto de monitoramento procurou-se contemplar as observações julgadas mais importantes, tendo por base os desempenhos mais relevantes apresentados por barragens com RAA, o que se tem relatado na bibliografia sobre os aspectos e conceitos do fenômeno expansivo da reação e as anomalias mais evidentes na estrutura de estudo.

Os aparatos de medição com Laser e LVDT foram desenvolvidos especificamente para sanar a necessidade de observação dos movimentos relativos entre muros e paredes, haja vista a configuração estrutural da tomada d'água e as consequências que os elevados movimentos poderão causar. Com este monitoramento será possível estimar os movimentos relativos entre os pontos de instalação dos equipamentos e, com isso, realizar projeções futuras de comportamento e eventuais necessidades de reparos para garantir a funcionalidade da estrutura.

Os aparatos de medição com Laser e LVDT concebidos e instalados estão apresentando funcionamento satisfatório, pois, os movimentos relativos registrados têm mostrado resultados coerentes. O Laser e o LVDT se mostraram propícios para a utilização requerida pelas inúmeras vantagens proporcionadas como a resolução, resistência e dimensões dos equipamentos e pelas condições a que estão expostos na tomada água da UHE Jaguari. Para utilização em outras instalações é necessário sempre analisar minuciosamente o catálogo técnico e o manual de todos os equipamentos envolvidos no sistema de medição, fornecidos pelos fabricantes, além de consultas aos representantes dos mesmos. Há uma série de características que devem ser notadas e que podem variar com os tipos de equipamentos e fabricantes, local e sistema de utilização, condições de exposição, entre outros.

O software de gerenciamento necessitou de algumas correções e seu funcionamento está apropriado. A solução para as falhas de aquisição de leituras decorrente da falta de energia no local foi sanada com a instalação de um no-break. Como são equipamentos energizados constantemente pela rede elétrica, recomendam-se proteções contra descargas ambientais e/ou outros tipos que possam danificar o material.

A execução dos furos de sondagem para a instalação do extensômetro e pêndulo invertido foi atípica e possivelmente não há barragens no Brasil onde foram executados furos de sondagem em extensão de concreto com características similares às da UHE Jaguari, ressaltando, principalmente, a elevada profundidade de cada um, o preenchimento do furo com água até o nível do reservatório (aproximadamente 50 m) e a localização em parede estrutural, onde é fundamental desviar das armaduras. Nos dois furos o comprimento total é de 114,66 m, o que torna estas instalações com características especiais. Os inconvenientes encontrados demandaram em perda de tempo, mas as instalações dos instrumentos foram finalizadas com sucesso.

As leituras no EH-1 têm mostrado elevação e o valor de deslocamento projetado para um ano de monitoramento está correspondente às leituras realizadas nos marcos superficiais que estão instalados na laje da tomada d'água. Desta forma, as diferentes técnicas para o monitoramento vertical têm mostrado resultados semelhantes, permitindo avaliar um valor para a taxa de expansão vertical da estrutura com ordem de grandeza de $30 \cdot 10^{-6}$.

As leituras dos medidores de fissuras, com mais de um ano de monitoramento, permitem concluir que há deslocamentos residuais e crescentes para grande parte dos equipamentos, predominantemente para o movimento de abertura, sendo que os movimentos das fissuras localizadas nos pilares têm sido mais discretos.

Os parâmetros de monitoramento, os instrumentos utilizados e os locais determinados para as instalações dos equipamentos de observação demonstraram ser os mais representativos diante das disponibilidades técnicas e econômicas do projeto. As análises dos movimentos confirmam as expectativas de comportamento para a estrutura, uma vez que se trata de concreto afetado pelo fenômeno químico da RAA. Os equipamentos que estão instalados há mais de um ano permitiram tirar conclusões preliminares indicativas e orientativas acerca do comportamento estrutural e aqueles que foram instalados há sete meses necessitam de um período maior de leituras para indicação de comportamento, ressaltando que todas as análises dos equipamentos para a verificação de movimentos residuais necessitam de um período

mínimo de um ano de monitoramento para experimentar todas as variações climáticas, além do tempo para a manifestação da RAA.

➤ SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros relacionados ao tema sugere-se:

- Analisar os movimentos indicados pelos instrumentos instalados neste projeto e instalar o pêndulo invertido para a medição dos deslocamentos horizontais;
- Realizar anualmente o monitoramento do mapeamento com plástico e caneta colorida;
- Elaborar uma modelagem matemática tridimensional da estrutura;
- Após no mínimo um ano de leituras dos instrumentos, aferir o modelo matemático para se tornar uma ferramenta útil na previsão do comportamento da tomada d'água;
- Elaborar e instalar um sistema de monitoramento para a casa de força da UHE Jaguari, local também afetado pela RAA e
- Analisar os testemunhos de sondagem do concreto da usina e realizar testes de reatividade com os agregados destes testemunhos para verificar grau de expansibilidade e comparar com os ensaios anteriores executados no material da obra.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P. A. O. **Transdutores para medida de deslocamentos lineares**. São Paulo: USP/EP, 2004. (Notas de aula).

AQUINO, H. A. **Laboratório de física - I**. Ilha Solteira: UNESP/FEIS, 2007. (Notas de aula).

ANDRIOLO, F. R. Observação de estruturas de concreto: validade quanto à ocorrência da Reação Álcali-Agregado. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS/IBRACON, 1997a. p. 243-263.

ANDRIOLO, F. R. Proposições para conservação de estruturas afetadas pela reação álcali-silica. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS/IBRACON, 1997b. p. 339-345.

BAGNATO, V. S. Os fundamentos da luz laser. **Física na escola**, v. 2, n. 2, out. 2001. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/>>. Acesso em: 15 set. 2008.

BEKEIERMAN, S.; BIEBERBACH, L.; FERREIRA, F. **Transdutores de posição e deslocamento**. Disponível em: <http://www.prd.usp.br/disciplinas/docs/pro2512-2004-Mauro_Marcelo/Trandutores_rev4.pdf>. Acesso em: 25 out. 2008.

BERNARDES, H. M. **Retroanálise do efeito estrutural das reações álcali-agregado em barragens de concreto**. 2000. 142 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

BERNARDES, H. M.; ECHEVERRIA, H. A. C. Identificação de parâmetros e controle do comportamento ao longo do tempo de uma grande estrutura. In: CONGRESSO TEMÁTICO DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES, 4, 2005, Bauru. **Anais...** Bauru: DINCON, 2005. p. 1-5.

BÉRUBÉ, M.-A.; DUCHESNE, J.; DORION, J. F.; RIVEST, M. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1215-1227, aug. 2002.

BÉRUBÉ, M.-A.; DURAND, B.; VÉZINA, D.; FOURNIER, B. Alkali-aggregate reactivity in Québec (Canada). **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, p. 226-245, 2000.

BLANKS, R. F.; KENNEDY, H. L. **The technology of cement and concrete**. New York: John Wiley & Sons, 1955.

BRUSAMARELLO, V. J. **Tecnologia LVDT**. Disponível em:
<<http://hermes.ucs.br/ccet/demc/vjbrusam/inst/lvdt20062.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2008.

BUENO, B. S.; SILVA, A.; VALENTIN, C. A. Projeto e construção de um sistema para registrar e gerenciar resultados de ensaios de tração em materiais geossintéticos. In: CONGRESSO DA QUALIDADE EM METROLOGIA, 1., 2007, São Paulo. **Anais...** Disponível em:
<<http://www.eesc.usp.br/sgs/geossinteticos/ArtigosPDF/Bueno%20Enqualab%202007.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2008

CANARY SYSTEMS. **Project profile – dam concrete growth**. New London. Disponível em: <http://www.canarysystems.com/pdfs/canary_pp8.pdf>. Acesso em: 25 out. 2008.

CAVALCANTI, A. J. C. T; SILVEIRA, J. F. A; DEGASPARE, J. C. AAR management at Paulo Afonso IV power plant – Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 11., 2000, Québec. **Proceedings...** Québec: International Academic Publishers, 2000. p. 1263-1273.

COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS - CBGB. **Guia básico de segurança de barragens**. São Paulo, 1998.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - CESP. Setor de Geração do Paraíba. **Infiltração de água pelas paredes de concreto à jusante da comporta da tomada d'água da Usina Jaguari**. Paraibuna: CESP, 1985. (Relatório técnico, TTB/004/85).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - CESP. Setor de Geração do Paraíba. **Constatação de trincas nas paredes da tomada d'água / cancelamento do PZ-06**. Paraibuna: CESP, 1990.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP. **Usina Jaguari**: barragem-dique / locação dos medidores de recalque e marcos superficiais. 2005. Desenho 009.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - CESP. **Usina Hidrelétrica Jaguari**. Disponível em: <<http://www.cesp.com.br>>. Acesso em 15 Set. 2008.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - CESP. **Instrumentação de obras civis**. Disponível em: <<http://www.cesp.com.br>>. Acesso em 04 Set. 2009.

CURTIS, D. D. Analysis and structure response to recent slot cutting at Mactaquac generating station. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 11., 2000, Québec. **Proceedings...** Québec: International Academic Publishers, 2000a. p. 1283-1293.

CURTIS, D. D. A review and analysis of AAR-effects in arch dam. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 11., 2000, Quebec, Canada. **Proceedings...** Québec: International Academic Publishers, 2000b. p. 1273-1283.

DORSCH, R. G.; HAUSLER, G.; HERRMANN, J. M. Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement. **Applied Optics**, v. 33, n. 7, p. 1306-1314, mar. 1994.

FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. Division of Dam Safety and Inspections. **Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects**. Chapter 11: Arch Dams. Washington, D.C., October, 1999. Disponível em: <<http://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/guidelines/eng-guide/chap11.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2008.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M-A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, p. 167-191, 2000.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M. A.; THOMAS, M. D. A.; FOLLIARD, K. J. Mitigation of the effect of alkali-silica reaction in concrete structures: a review. **IBRACON Materials Journal**, v. 1, n. 1, p. 35-42, 2005.

FRADE, G. C. Uma nova demanda para os laboratórios de calibração. **Metrologias & Instrumentação**. v. 55. Disponível em: <<http://www.banasmetrologia.com.br/revista.asp?codigo=2476>>. Acesso em: 10 nov. 2008.

GAGG, G. Aplicação da gravimetria na detecção de subsidência na região de barragens. In: SEMINÁRIO ANUAL DE PESQUISAS EM GEODÉSIA NA UFRGS, 2., 2007, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2007. p. 35-39. CD-ROM.

GALLETTI, A. A. B.; SILVEIRA, J. F. A.; ANDRADE, M. A. S.; PERES, R. G. Inspeções realizadas nas usinas de Furnas para detectar reação álcali-agregado. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS/IBRACON, 1997. p. 277-283.

GIACCIO, G.; ZERBINO, R.; PONCE, J. M.; BATIC, O. R. Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 993-1004, 2008.

GIECK, K. **Manual de fórmulas técnicas**. São Paulo: HEMUS, 1975.

GOULART NETO, A. A.; GALLETTI, A. A. B.; TORTORELLO, F. I.; HASPARYK, N. P. A.; GÓZ, R. S.; BITTENCOURT, R. M.; PACELLI, W. A. Metodologia para verificação da influência da RAA em estruturas de concreto no campo e no laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 1998. p.1-22.

GUERRA, M. O.; CUNHA, E. G. N.; BRAUN, P. V. C. B.; SOBRINHO, E. F. G.; JULIANI, M.; SCANDIUZZI, L. Aspectos da reatividade álcali-agregado na Usina elevatória de Traição. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS/IBRACON, 1997. p. 223-231.

GUERRA, M. O.; ERBELLA, C. A. C.; SOBRINHO, E. F. G.; CARONE, R.; SILVEIRA, J. F. A. Plano de investigação e auscultação da reatividade álcali-agregado na barragem reguladora Billings-Pedras. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS/IBRACON, 1997. p. 265-275.

GRANEMANN, D. C. **Estabelecimento de uma rede geodésica para o monitoramento de estruturas**: estudo de caso na Usina Hidrelétrica Salto Caxias. 2005. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa**. 1999. 257 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

HIDROSERVICE ENGENHARIA LTDA. **Projetos da tomada d'água da UHE Jaguari.** [196-]. Desenho JA-TA 7.

HIDROSERVICE ENGENHARIA LTDA. **Projetos da tomada d'água da UHE Jaguari.** [196-]. Desenho JA-TA 17.

HIDROSERVICE ENGENHARIA LTDA. **Projetos da tomada d'água da UHE Jaguari.** [196-]. Desenho JA-TA 37.

HOBBS D. W. **Alkali-silica reaction in concrete.** London: Thomas Telford, 1988.

HOYO, R. D.; GUTIERREZ, A. Safety assessment in concrete dams. In: CONGRÉS DES GRANDS BARRAGES, 18., 1994, Durban. **Anais...** França : [s.n.], 1994. p. 499-509.

HUGHES, M. T. & CURTIS, D. D. **Life extension of concrete structures affected by an Alkali-Aggregate Reaction at Mactaquac Generating Station.** Disponível em: <http://www.hatchenergy.com/Company/Expertise/ExpHydroAAR/TechPapers/HydroVision_Mactaquac_2001.pdf>. Acesso em: 30 set. 2008.

ICASSATTI, R. CI aprova política nacional de segurança de barragens. **Agência Senado,** Brasília, DF, 04 mar. 2010. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br/agencia/verNoticia.aspx?docNoticia=99762&codAplicativo=2>>. Acesso em: 09 abr. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS - IBGE. **Especificações e normas para levantamentos geodésicos - PR 022.** Rio de Janeiro, 1983.

KRELLING, P. C. L. **Concepção de um inclinômetro foto-mecânico para controle geodésico de estruturas.** 2006. 187 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

KUPERMAN, S. C.; DARDIS, C. R.; AUGUSTINIS, J. A.; MELO, I. A.; VASCONCELOS, S. E.; TUNG, W. S. Evolução da reação álcali-agregado na tomada d'água do túnel 6 do Sistema Cantareira. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CBGB/FURNAS/IBRACON, 2006. CD-ROM.

LO, K. Y.; HEFNY, A. M. Measurements of residual expansion rates resulting from alkali-aggregate reaction in existing concrete dams. **ACI Materials Journal**, n. 96-M42, p. 339-347, June 1999.

LU, D.; ZHOU, X.; ZHONGZI, X.; LAN, X.; TANG, M.; FOURNIER, B. Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the Three-Gorges dam concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1157-1165, jan. 2006.

LVDT. [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/LVDT>>. Acesso em: 21 set. 2009.

MACMILLAN D.; MCPHAIL G. Assessment and monitoring of Pointe du Bois G. S. powerhouse. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 11., 2000, Québec. **Proceedings...** Québec: International Academic Publishers, 2000. p. 1353-1362.

MAGALHÃES, R. A.; CARIM, A. L. C.; COSTA, A. M.; MOURA, C. N. SHAAT, M. Management of structures of Peti dam affected by AAR. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 11., 2000, Québec. **Proceedings...** Québec: International Academic Publishers, 2000. p. 1363-1372.

MAGALHÃES, R. A.; MOURA, C. N. Caracterização, histórico e obtenção de parâmetros da reação álcali-agregado para modelagem matemática da barragem Peti. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS/IBRACON, 1997. p. 233-239.

MARQUES, M. L. **Estudo da reação álcali-agregado na tomada d'água da UHE Jaguari por meio de ensaios laboratoriais**. 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MATOS, S. F. **Durabilidade de instrumentos para auscultação de barragem de concreto**. Estudo de caso: extensômetros e tensômetros para concreto na barragem de Itaipu. 2002. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENDES, J. O. F. **Relatório do 3º estágio do aluno da faculdade de engenharia da universidade do porto**. Lisboa: Serviço de Barragens do L.N.E.C., 1962.

MENESCAL, R. A. **Gestão da segurança de barragens no Brasil:** proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo. 2009. 769 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MICRO-EPSILON. **OptoNCDT:** Laser Displacement sensor. [S.l.: s.n, 200?a]. Disponível em: <<http://www.micro-epsilon.com/>> Acesso em: 12 abr. 2008.

MICRO-EPSILON. **InduSENSOR:** Linear Inductive Displacement Sensors. [S.l.: s.n, 200?b]. Disponível em: <<http://www.micro-epsilon.com/>> Acesso em: 12 abr. 2008.

NADAL, C. A.; FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K.; FREITAS, S. R. C.; SOARES, M. A.; FERREIRA, E. S.; BOSZCZOWSKI, R. B. O Uso das ciências geodésicas no monitoramento de barragens - Barragem de Salto Caxias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO – COBRAC, 1., 2006, Florianópolis. Disponível em: <http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/cobrac_2006/176.pdf> Acesso em: 22 out. 2008.

OH, B. H.; KIM, K. S. Shear behavior of full-scale post-tensioned prestressed concrete bridge girders. **ACI Structural Journal**, n. 101-S17, p. 176-182, mar. 2004.

ORLOWSKI, E. A. G. Avaliação e monitoramento de trincas em barragens de concreto: estudo de caso UHE Mascarenhas. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2., 2003, Salvador. **Anais...**, Salvador: ANEEL, 2003. p. 461-464.

PAPPALARDO JUNIOR, A. **Uma metodologia para a modelagem matemática de barragens de concreto afetadas pela reação álcali-agregado.** 1998. 181 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

PIASENTIN, C. **A auscultação e a segurança de barragem.** São Paulo: ITAIPU BINACIONAL, 1999.

PIASENTIN, C. Considerações sobre a importância das observações visuais na auscultação de barragens. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 25., 2003, Salvador. **Anais...** Salvador: CBDB, 2003. p. 149-155.

PIASENTIN, C.; JULIANI, M.; BECOCCI, L.; BARRETO, C. R. N. G. Comportamento e tratamentos recentes da barragem de Traição afetada pela RAA. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CBGB/FURNAS/IBRACON, 2006. CD-ROM.

PRISZKULNIK, S. Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto afetadas pelas reações cimento-agregado. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2. p. 1017-1071.

RELATÓRIO FINAL – **Panorama brasileiro e relato técnico do Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto**. Goiânia: CBGB/FURNAS, 1999. Parte I.

RODRIGUES, R. O. **Estudo sobre modelagem matemática de estruturas de concreto afetadas por reações álcali-agregado**. 2002. 257 f. Tese (Pós-Doutorado) – University of California at Berkeley – UCB. Berkeley, 2002. (Relatório de Pesquisa).

SAOUMA, V.; XI, Y. **Literature review of alkali aggregate reactions in concrete dams**. Boulder: Department of Civil, Environmental, & Architectural Engineering, University of Colorado, 2004. Disponível em: <<http://www.dam-analysis.com/AAR/ASR-SOA-V-4.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2008.

SAYÃO, A. A segurança das barragens brasileiras. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 10 jun. 2009. Tendências e Debates.

SCRUBY, C. B.; DRAIN, L. E. **Laser ultrasonics: techniques and applications**: CRC Press, 1990. Disponível em: <http://books.google.com/books?hl=pt-BR&lr=&id=KgXPqx9ST-wC&oi=fnd&pg=PT6&dq=Scruby,+C.B.+and+Drain,+L.E.,+1990,+Laser+Ultrasonics,+Techniques+and&ots=W85OxEPI_O&sig=657INC0MXWQ_3FBVFJVjk43gmRM#PPP1,M1>. Acesso em: 25 set. 2008.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas no Complexo Paulo Afonso / CHESF**: influência da reação nas propriedades do concreto. 2007. 220 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SILVA, J. L. B. **Nivelamento geométrico**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. (Notas de aula).

SILVEIRA, J. F. A. A importância dos extensômetros múltiplos na instrumentação de barragens afetadas pela RAA. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CBGB/FURNAS/IBRACON, 2006. CD-ROM.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

SILVEIRA, J. F. A. Auscultação e observação de estruturas afetadas pela RAA. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Relatório final...** Rio de Janeiro: CBDB, 1999. p. 91-115.

SILVEIRA, J. F. A. A expansão do concreto em barragens afetadas pela RAA e a importância das tensões confinantes. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS/IBRACON, 1997. p. 285-291.

SILVEIRA, J. F. A.; DEGASPARE, J. C.; CAVALCANTI, A. J. C. T. Diagnosis of the cause of the progressive concrete swelling at the Paulo Afonso I, II and III underground power stations. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 11., 2000, Québec. **Proceedings...** Québec: International Academic Publishers, 2000. p. 1393-1402.

SWAMY, R. N. Assessment and rehabilitation of AAR-affected structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, n. 5-6, p. 427-440, 1997.

TAPFUMA, V.; MAZVIDZA, D.; GOGUEL, B.; MOLYNEUX, J. D. Kariba dam safety monitoring and resulting maintenance works. In: CONGRÉS DES GRANDS BARRAGES, 18., 1994, Durban. **Anais...** França: [s.n.], 1994. p. 1445-1464.

THEMAG. Reavaliação dos valores limites da instrumentação de auscultação das barragens. **Relatório de inspeção das estruturas de concreto da UHE Jaguari: nº 6280-01-GL-420-RI-0002.** Jaguari: UHE, 2000.

THOMAS, M.; BEAMAN, N.; HAYMAN, S., GILKS, P. Evaluating ASR prevention strategies for the reconstruction of concrete structures at Mactaquac Generating Station. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 13., 2008, Tromsø. **Anais...** Noruega: [s.n.], 2008. CD-ROM.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Department of the Army. **Rock foundations.** Washington, D.C., 1994. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/publications/engine-manuals/em1110-1-2908/toc.htm>>. Acesso em: 10 set. 2008.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Department of the Army. **Geodetic and control surveying.** Washington, D.C., 2002. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/publications/engine-manuals/em1110-1-1004/toc.htm>>. Acesso em: 10 set. 2008.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Department of the Army. **Instrumentation for concrete structures**. Washington, D.C., 1980. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-4300/toc.htm>>. Acesso em: 10 set. 2008.

VEIGA, F. N.; GONÇALVES, I. N.; ANDRADE, N. P. H. Microscopia eletrônica de varredura de géis provenientes de usinas hidrelétricas. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais....** Goiânia: CBGB/FURNAS/IBRACON, 1997. p. 69-79.

ZOCOLOTTI FILHO, C. A. **Utilização de técnicas de poligonação de precisão para o monitoramento de pontos localizados em galerias de inspeção**: estudo de caso da U. H. de Salto Caxias. 2005. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

ZOILLO, C. S.; BERNARDES, H. M.; SALLES, F. M.; KUPERMAN, S. C.; MARQUES, M. L.; PÍNFAARI, J. C. Avaliação da evolução da abertura das trincas ocasionadas pela reação álcali-agregado na laje da Tomada d' Água da UHE Jaguari. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 1., 2008, Salvador. **Anais...** Salvador: IBRACON, 2008. CD ROM.

APÊNDICE A – Dilatação térmica linear e incertezas

Uma estimativa das incertezas associadas ao cálculo da dilatação térmica do material e à obtenção dos deslocamentos relativos dos muros guia da grade foi realizada para estudar e viabilizar a utilização dos aparatos de medição descritos nos itens 5.3.3 e 5.3.4.

A dilatação térmica linear é calculada por meio da fórmula:

$$\Delta L = L_0 * \alpha * \Delta T$$

O cálculo das incertezas associadas na obtenção da dilatação térmica foi feito, seguindo a teoria de erros constante em Aquino (2007). De acordo com a teoria dos erros:

$$(\Delta L \pm \delta) = (L_i \pm \Delta L_i) * \alpha * [(T_f \pm \Delta T_f) - (T_i \pm \Delta T_i)]$$

Onde:

δ é a incerteza total do cálculo e ΔL_i , ΔT_f , ΔT_i , as incertezas associadas às leituras de comprimento e temperatura, respectivamente.

ΔL_i , ΔT_f , ΔT_i são obtidos de forma simplificada, considerando que a incerteza máxima na medição direta é a menor leitura do equipamento de medição.

Para as condições da UHE Jaguari, uma situação extrema a ser considerada é a estimativa dos parâmetros L_i , α , T_f e T_i como 6230 mm, $1,5 * 10^{-6}$, 45°C e 15°C, respectivamente.

A medição do comprimento inicial L_i será feito com uma trena e a resolução do termômetro será de 0,1°C, portanto, ΔL_i , ΔT_f , ΔT_i , são considerados 1 mm e 0,1°C, respectivamente.

$$(\Delta L \pm \delta) = (6230 \pm 1) * 1,5 * 10^{-6} [(45 \pm 0,1) - (15 \pm 0,1)]$$

Aplicando as operações com desvios de Aquino (2007), a dilatação térmica do invar com a incerteza foi de $(0,28 \pm 0,00)$ mm, ou seja, para o número de casas decimais especificado, não haverá incerteza no cálculo dos deslocamentos referentes à variação térmica da barra de invar.

No entanto, os resultados buscados são os de deslocamentos relativos entre os muros, que são obtidos de forma indireta pela seguinte relação:

$$\text{Deslocamento dos muros (DM)} = \text{Leitura total do laser (Lt)} - \Delta L$$

Utilizando a teoria dos erros e as operações com desvios, tem-se:

$$(\text{DM} \pm \text{incerteza}) = (\text{Lt} \pm \text{incerteza laser}) - (\Delta L \pm \delta)$$

$$(\text{DM} \pm \text{incerteza}) = (\text{Lt} - \Delta L) \pm (\text{incerteza laser} + \delta)$$

A incerteza do laser é dada pela sua menor leitura, então será de 0,01 mm. Portanto:

$$(\text{DM} \pm \text{incerteza}) = (\text{Lt} - \Delta L) \pm (0,01 + 0,00)$$

$$(\text{DM} \pm \text{incerteza}) = ((\text{Lt} - \Delta L) \pm 0,01)$$

Portanto, a estimativa da incerteza associada à obtenção indireta dos deslocamentos relativos dos muros é da ordem de 0,01 mm, ou seja, é compatível com os deslocamentos que se espera medir. Vale ressaltar que este estudo foi uma estimativa para a viabilização da alternativa.

A mesma análise foi feita para o aço comum com $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$.

APÊNDICE B – Planilhas de leituras

Tabela 6: Leituras e deslocamentos – EH-1

EH - 1									
Data	Haste 1 (H1)	Haste 2 (H2)	Haste 3 (H3)	Deslocamento					
				H1	H2	H3	H1 - H2	H2-H3	H1-H3
24/08/2009	4,45	5,09	4,85	0	0	0	0	0	0
25/08/2009	4,46	5,1	4,86	-0,01	-0,01	-0,01	0	0	0
26/08/2009	4,45	5,09	4,85	0	0	0	0	0	0
27/08/2009	4,45	5,09	4,85	0	0	0	0	0	0
28/08/2009	4,45	5,09	4,85	0	0	0	0	0	0
01/09/2009	4,43	5,09	4,85	0,02	0	0	0,02	0	0,02
02/09/2009	4,42	5,09	4,86	0,03	0	-0,01	0,03	0,01	0,04
03/09/2009	4,41	5,09	4,84	0,04	0	0,01	0,04	-0,01	0,03
04/09/2009	4,47	5,13	4,9	-0,02	-0,04	-0,05	0,02	0,01	0,03
11/09/2009	4,44	5,12	4,89	0,01	-0,03	-0,04	0,04	0,01	0,05
17/09/2009	4,38	5,1	4,86	0,07	-0,01	-0,01	0,08	0	0,08
25/09/2009	4,32	5,08	4,84	0,13	0,01	0,01	0,12	0	0,12
01/10/2009	4,3	5,07	4,83	0,15	0,02	0,02	0,13	0	0,13
08/10/2009	4,27	5,09	4,86	0,18	0	-0,01	0,18	0,01	0,19
14/10/2009	4,2	5,06	4,84	0,25	0,03	0,01	0,22	0,02	0,24
20/10/2009	4,18	5,05	4,83	0,27	0,04	0,02	0,23	0,02	0,25
29/10/2009	4,15	5,05	4,86	0,3	0,04	-0,01	0,26	0,05	0,31
05/11/2009	4,08	5,06	4,86	0,37	0,03	-0,01	0,34	0,04	0,38
12/11/2009	4,02	5,03	4,84	0,43	0,06	0,01	0,37	0,05	0,42
19/11/2009	3,91	5,04	4,86	0,54	0,05	-0,01	0,49	0,06	0,55
24/11/2009	3,87	4,97	4,85	0,58	0,12	0	0,46	0,12	0,58
03/12/2009	3,8	4,93	4,81	0,65	0,16	0,04	0,49	0,12	0,61
10/12/2009	3,78	4,85	4,72	0,67	0,24	0,13	0,43	0,11	0,54
23/12/2009	3,66	4,77	4,71	0,79	0,32	0,14	0,47	0,18	0,65
04/01/2010	3,56	4,7	4,68	0,89	0,39	0,17	0,5	0,22	0,72
19/01/2010	3,49	4,63	4,61	0,96	0,46	0,24	0,5	0,22	0,72
01/02/2010	3,45	4,63	4,61	1	0,46	0,24	0,54	0,22	0,76
02/03/2010	3,41	4,5	4,55	1,04	0,59	0,3	0,45	0,29	0,74
19/03/2010	3,3	4,44	4,44	1,15	0,65	0,41	0,5	0,24	0,74

Tabela 7: Leituras e deslocamentos – EH-2

EH - 2					
Data	Haste 1 (H1)	Haste 2 (H2)	Deslocamento		
			H1	H2	H1 - H2
24/08/2009	5,6	5,22	0	0	0
25/08/2009	5,61	5,19	-0,01	0,03	-0,04
26/08/2009	5,57	5,18	0,03	0,04	-0,01
27/08/2009	5,57	5,18	0,03	0,04	-0,01
28/08/2009	5,56	5,17	0,04	0,05	-0,01
01/09/2009	5,56	5,16	0,04	0,06	-0,02
02/09/2009	5,55	5,16	0,05	0,06	-0,01
03/09/2009	5,55	5,16	0,05	0,06	-0,01
04/09/2009	5,57	5,18	0,03	0,04	-0,01
11/09/2009	5,58	5,2	0,02	0,02	0
17/09/2009	5,56	5,19	0,04	0,03	0,01
25/09/2009	5,56	5,18	0,04	0,04	0
01/10/2009	5,57	5,18	0,03	0,04	-0,01
08/10/2009	5,58	5,19	0,02	0,03	-0,01
14/10/2009	5,57	5,17	0,03	0,05	-0,02
20/10/2009	5,56	5,16	0,04	0,06	-0,02
29/10/2009	5,57	5,18	0,03	0,04	-0,01
05/11/2009	5,59	5,21	0,01	0,01	0
12/11/2009	5,61	5,2	-0,01	0,02	-0,03
19/11/2009	5,61	5,22	-0,01	0	-0,01
24/11/2009	5,61	5,21	-0,01	0,01	-0,02
03/12/2009	5,58	5,19	0,02	0,03	-0,01
10/12/2009	5,55	5,09	0,05	0,13	-0,08
23/12/2009	5,52	5,06	0,08	0,16	-0,08
04/01/2010	5,53	5,07	0,07	0,15	-0,08
19/01/2010	5,5	5	0,1	0,22	-0,12
01/02/2010	5,49	4,98	0,11	0,24	-0,13
02/03/2010	5,41	4,88	0,19	0,34	-0,15
19/03/2010	5,35	4,83	0,25	0,39	-0,14

Tabela 8: Leituras e deslocamentos 6h00 – aparato de medição com laser

Data	Horário	D1	T1	T2	T3	T méd	Dilatação Térmica	Deslocamento Total	Deslocamento Real
24/08/2009						24,6			0,00
25/08/2009	6:00	-0,12	17,7	17,7	17,4	17,6	-0,07	-0,42	-0,35
26/08/2009	6:00	-0,20	17,4	17,3	17,1	17,3	-0,07	-0,50	-0,43
27/08/2009	6:00	-0,21	18,5	18,5	18,0	18,3	-0,06	-0,51	-0,45
28/08/2009	6:00	-0,35	19,3	18,8	17,8	18,6	-0,06	-0,65	-0,59
29/08/2009	6:00	-0,59	17,1	16,7	15,9	16,6	-0,07	-0,89	-0,82
30/08/2009	6:00	-0,31	19,7	19,6	18,8	19,4	-0,05	-0,61	-0,56
31/08/2009	6:00	-0,59	18,7	18,2	17,3	18,1	-0,06	-0,89	-0,83
01/09/2009	6:00	-0,35	20,4	20,1	19,4	20,0	-0,04	-0,65	-0,61
02/09/2009	6:00	-0,3	20	19,9	19,3	19,7	-0,05	-0,60	-0,55
03/09/2009	6:00	-0,34	21,1	20,4	19,5	20,3	-0,04	-0,64	-0,60
04/09/2009	6:00	-0,04	21,6	21,8	21,4	21,6	-0,03	-0,34	-0,31
12/09/2009	6:00	0,09	22,7	22,5	22	22,4	-0,02	-0,21	-0,19
13/09/2009	6:00	-0,13	21,8	21,6	21	21,5	-0,03	-0,43	-0,40
14/09/2009	6:00	-0,02	23,4	23	22,2	22,9	-0,02	-0,32	-0,30
15/09/2009	6:00	-0,13	20,8	20,6	20,4	20,6	-0,04	-0,43	-0,39
16/09/2009	6:00	-0,08	21,4	21,1	20,9	21,1	-0,03	-0,38	-0,35
17/09/2009	6:00	-0,17	22,2	21,8	21,2	21,7	-0,03	-0,47	-0,44
18/09/2009	6:00	-0,13	21,5	21,6	21,1	21,4	-0,03	-0,43	-0,40
19/09/2009	6:00	-0,04	21,1	21,1	20,8	21,0	-0,03	-0,34	-0,31
20/09/2009	6:00	-0,01	21,7	21,7	21,3	21,6	-0,03	-0,31	-0,28
21/09/2009	6:00	0	21,5	21,3	20,8	21,2	-0,03	-0,30	-0,27
22/09/2009	6:00	-0,05	19,8	19,7	19,5	19,7	-0,05	-0,35	-0,30
23/09/2009	6:00	0,04	20,9	20,8	20,6	20,8	-0,04	-0,26	-0,22
24/09/2009	6:00	-0,24	18,2	18,3	18,2	18,2	-0,06	-0,54	-0,48
25/09/2009	6:00	-0,29	17,5	17,3	17	17,3	-0,07	-0,59	-0,52
23/10/2009	6:00	-0,01	22,8	22,7	22,3	22,6	-0,02	-0,31	-0,29
24/10/2009	6:00	-0,01	23,2	23,1	22,6	23,0	-0,02	-0,31	-0,29
25/10/2009	6:00	0,12	24,4	24,3	23,7	24,1	0,00	-0,18	-0,18
26/10/2009	6:00	0,01	24,1	23,9	23,3	23,8	-0,01	-0,29	-0,28
27/10/2009	6:00	0,03	22,5	22,2	21,8	22,2	-0,02	-0,27	-0,25
28/10/2009	6:00	0,05	22,3	22	21,4	21,9	-0,03	-0,25	-0,22
30/10/2009	6:00	-0,04	22,1	22,1	21,8	22,0	-0,02	-0,34	-0,32
31/10/2009	6:00	0,01	24	23,9	23,3	23,7	-0,01	-0,29	-0,28
01/11/2009	6:00	0	23,8	23,8	23,6	23,7	-0,01	-0,30	-0,29
02/11/2009	6:00	-0,16	23,6	23,2	22,3	23,0	-0,01	-0,46	-0,45
03/11/2009	6:00	-0,02	24,2	24	23,1	23,8	-0,01	-0,32	-0,31
04/11/2009	6:00	-0,22	23,5	23,3	22,2	23,0	-0,01	-0,52	-0,51
05/11/2009	6:00	0,13	26,4	26,2	25,5	26,0	0,01	-0,17	-0,18
06/11/2009	6:00	0,13	26,1	26	25,3	25,8	0,01	-0,17	-0,18
11/11/2009	6:00	0,09	25,3	25,1	24,6	25,0	0,00	-0,21	-0,21
12/11/2009	6:00	0,13	24,6	24,6	24,2	24,5	0,00	-0,17	-0,17
13/11/2009	6:00	0,09	25,8	25,6	24,9	25,4	0,01	-0,21	-0,22
14/11/2009	6:00	0,08	26,5	26,7	26,3	26,5	0,02	-0,22	-0,24
15/11/2009	6:00	0,12	27,3	27,3	26,7	27,1	0,02	-0,18	-0,20
16/11/2009	6:00	-0,04	23,6	23,6	22,8	23,3	-0,01	-0,34	-0,33
17/11/2009	6:00	-0,03	23,5	23,1	22,4	23,0	-0,01	-0,33	-0,32
18/11/2009	6:00	0	23,9	23,9	23,6	23,8	-0,01	-0,30	-0,29
19/11/2009	6:00	0,11	25,4	25,5	25,3	25,4	0,01	-0,19	-0,20
20/11/2009	6:00	0,08	27,8	27,5	26,8	27,4	0,03	-0,22	-0,25
21/11/2009	6:00	0,08	25,5	25,5	25,2	25,4	0,01	-0,22	-0,23
22/11/2009	6:00	0,05	24,4	24,3	23,9	24,2	0,00	-0,25	-0,25
23/11/2009	6:00	0,2	25,6	25,6	25,4	25,5	0,01	-0,10	-0,11
28/11/2009	6:00	0,08	24,1	24,2	24,2	24,2	0,00	-0,22	-0,22
29/11/2009	6:00	0,05	23,9	23,9	23,7	23,8	-0,01	-0,25	-0,24
30/11/2009	6:00	0,12	24,8	24,6	24,1	24,5	0,00	-0,18	-0,18
08/12/2009	6:00	0,09	23,7	23,8	23,6	23,7	-0,01	-0,21	-0,20
09/12/2009	6:00	0,01	22,6	22,5	22,3	22,5	-0,02	-0,29	-0,27
10/12/2009	6:00	0,03	22,4	22,3	22,1	22,3	-0,02	-0,27	-0,25
11/12/2009	6:00	0,08	23	23,1	23	23,0	-0,01	-0,22	-0,21
12/12/2009	6:00	0,05	23,9	23,9	23,6	23,8	-0,01	-0,25	-0,24

Data	Horário	D1	T1	T2	T3	T méd	Dilatação Térmica	Deslocamento Total	Deslocamento Real
13/12/2009	6:00	0,04	23,4	23,4	23,1	23,3	-0,01	-0,26	-0,25
14/12/2009	6:00	-0,2	20,8	20,6	20,3	20,6	-0,04	-0,50	-0,46
15/12/2009	6:00	-0,01	21,6	21,7	21,5	21,6	-0,03	-0,31	-0,28
16/12/2009	6:00	0,03	24,3	24,1	23,7	24,0	-0,01	-0,27	-0,26
17/12/2009	6:00	0,03	23	22,8	22,4	22,7	-0,02	-0,27	-0,25
18/12/2009	6:00	-0,1	21,7	21,7	21,4	21,6	-0,03	-0,40	-0,37
24/12/2009	6:00	0,08	25,1	25,1	25	25,1	0,00	-0,22	-0,22
25/12/2009	6:00	0,02	24,1	24	23,5	23,9	-0,01	-0,28	-0,27
26/12/2009	6:00	0,03	24,6	24,6	24,3	24,5	0,00	-0,27	-0,27
27/12/2009	6:00	0,16	25,2	25,3	25,1	25,2	0,01	-0,14	-0,15
28/12/2009	6:00	0,12	24,5	24,5	24,3	24,4	0,00	-0,18	-0,18
29/12/2009	6:00	0,13	25	25	24,7	24,9	0,00	-0,17	-0,17
30/12/2009	6:00	0,13	26,4	26	25,6	26,0	0,01	-0,17	-0,18
31/12/2009	6:00	-0,04	23,3	23,3	23,2	23,3	-0,01	-0,34	-0,33
01/01/2010	6:00	0,06	24,1	24,2	24,1	24,1	0,00	-0,24	-0,24
02/01/2010	6:00	0,04	22,9	22,7	22,6	22,7	-0,02	-0,26	-0,24
03/01/2010	6:00	0,12	25,4	25,3	24,9	25,2	0,01	-0,18	-0,19
04/01/2010	6:00	0,13	26,6	26,3	25,5	26,1	0,01	-0,17	-0,18
05/01/2010	6:00	0,03	25,4	25,1	24,6	25,0	0,00	-0,27	-0,27
06/01/2010	6:00	-0,06	24,1	23,8	23,4	23,8	-0,01	-0,36	-0,35
07/01/2010	6:00	0,05	25,2	25,1	24,7	25,0	0,00	-0,25	-0,25
08/01/2010	6:00	0,03	25,6	25,5	25,2	25,4	0,01	-0,27	-0,28
09/01/2010	6:00	-0,09	25,2	24,8	24	24,7	0,00	-0,39	-0,39
10/01/2010	6:00	-0,01	25,4	25,1	24,6	25,0	0,00	-0,31	-0,31
11/01/2010	6:00	0,07	26,8	26,4	25,6	26,3	0,02	-0,23	-0,25
12/01/2010	6:00	-0,19	24,3	23,9	23,2	23,8	-0,01	-0,49	-0,48
13/01/2010	6:00	0,06	25,1	25	24,5	24,9	0,00	-0,24	-0,24
14/01/2010	6:00	0,12	25,4	25,4	25,1	25,3	0,01	-0,18	-0,19
15/01/2010	6:00	-0,01	25	25	24,7	24,9	0,00	-0,31	-0,31
29/01/2010	6:00	0,08	23,6	23,5	23,3	23,5	-0,01	-0,22	-0,21
30/01/2010	6:00	0,06	23,9	23,6	23,3	23,6	-0,01	-0,24	-0,23
31/01/2010	6:00	0	24,2	24	23,7	24,0	-0,01	-0,30	-0,29
01/02/2010	6:00	-0,01	23,9	23,8	23,3	23,7	-0,01	-0,31	-0,30
02/02/2010	6:00	0	24,4	24,2	23,7	24,1	0,00	-0,30	-0,30
03/02/2010	6:00	-0,17	24,6	24,3	23,6	24,2	0,00	-0,47	-0,47
04/02/2010	6:00	-0,05	24,5	24,3	23,7	24,2	0,00	-0,35	-0,35
05/02/2010	6:00	-0,12	24	23,8	23,3	23,7	-0,01	-0,42	-0,41
06/02/2010	6:00	0,01	26,2	26,3	25,6	26,0	0,01	-0,29	-0,30
07/02/2010	6:00	-0,19	25,1	25	24,4	24,8	0,00	-0,49	-0,49
08/02/2010	6:00	-0,04	26,7	26,6	25,9	26,4	0,02	-0,34	-0,36
09/02/2010	6:00	0,08	26,9	27	26,2	26,7	0,02	-0,22	-0,24
10/02/2010	6:00	-0,13	24,4	24,3	24,1	24,3	0,00	-0,43	-0,43
11/02/2010	6:00	-0,04	24	24	23,9	24,0	-0,01	-0,34	-0,33
12/02/2010	6:00	-0,02	25,2	25	24,3	24,8	0,00	-0,32	-0,32
13/02/2010	6:00	0,03	26,5	26,4	25,6	26,2	0,01	-0,27	-0,28
14/02/2010	6:00	-0,1	27,2	27	26,1	26,8	0,02	-0,40	-0,42
15/02/2010	6:00	-0,13	27,4	27	26	26,8	0,02	-0,43	-0,45
16/02/2010	6:00	-0,01	26,7	26,5	25,8	26,3	0,02	-0,31	-0,33
17/02/2010	6:00	0,01	26,6	26,7	26,2	26,5	0,02	-0,29	-0,31
18/02/2010	6:00	-0,1	24,6	24,6	24,2	24,5	0,00	-0,40	-0,40
19/02/2010	6:00	-0,01	24,7	24,5	24,2	24,5	0,00	-0,31	-0,31
12/03/2010	6:00	-0,2	25,7	25,6	25,2	25,5	0,01	-0,50	-0,51
13/03/2010	6:00	-0,17	25,6	25,3	24,7	25,2	0,01	-0,47	-0,48
14/03/2010	6:00	-0,02	26,5	26,5	25,8	26,3	0,02	-0,32	-0,34
15/03/2010	6:00	-0,11	25,7	25,6	25,1	25,5	0,01	-0,41	-0,42
16/03/2010	6:00	-0,05	25,8	25,5	25,1	25,5	0,01	-0,35	-0,36
17/03/2010	6:00	-0,35	23,7	23,6	23,1	23,5	-0,01	-0,65	-0,64
18/03/2010	6:00	-0,3	23,1	22,9	22,4	22,8	-0,02	-0,60	-0,58
19/03/2010	6:00	-0,25	24,6	24,5	24,1	24,4	0,00	-0,55	-0,55
20/03/2010	6:00	-0,43	23,9	23,3	22,5	23,2	-0,01	-0,73	-0,72
21/03/2010	6:00	-0,23	24,6	24,7	24,2	24,5	0,00	-0,53	-0,53
22/03/2010	6:00	-0,32	24	23,7	23	23,6	-0,01	-0,62	-0,61
23/03/2010	6:00	-0,2	24,3	24	23,2	23,8	-0,01	-0,50	-0,49

Tabela 9: Leituras e deslocamentos 15h00 – aparato de medição com laser

Data	Horário	D1	T1	T2	T3	T méd	Dilatação Térmica	Deslocamento Total	Deslocamento Real
24/08/2009						24,6			0,00
25/08/2009	15:00	0,06	23,1	22,1	21,1	22,1	-0,02	-0,24	-0,22
26/08/2009	15:00	0,82	31,8	31,5	28,8	30,7	0,06	0,52	0,46
27/08/2009	15:00	0,97	38,9	33,8	29,7	34,1	0,09	0,67	0,58
29/08/2009	15:00	1,42	39,9	37	33,3	36,7	0,11	1,12	1,01
30/08/2009	15:00	1,26	38,1	37,1	34	36,4	0,11	0,96	0,85
31/08/2009	15:00	1,5	41,1	38,8	35,2	38,4	0,13	1,20	1,07
01/09/2009	15:00	1,05	35,9	35,7	33,9	35,2	0,10	0,75	0,65
02/09/2009	15:00	1,58	44,4	41,9	38,3	41,5	0,16	1,28	1,12
03/09/2009	15:00	1,33	39	37,2	35,1	37,1	0,12	1,03	0,91
12/09/2009	15:00	1,24	39,8	37,8	34,8	37,5	0,12	0,94	0,82
13/09/2009	15:00	1,48	40,2	40,9	38,4	39,8	0,14	1,18	1,04
14/09/2009	15:00	0,03	23	22,8	21,9	22,6	-0,02	-0,27	-0,25
15/09/2009	15:00	0,82	33,7	31,9	29,5	31,7	0,07	0,52	0,45
16/09/2009	15:00	1,1	41,2	35,4	31,9	36,2	0,11	0,80	0,69
17/09/2009	15:00	0,8	32,6	33,6	31,4	32,5	0,07	0,50	0,43
19/09/2009	15:00	0,13	28,7	28,5	27,5	28,2	0,03	-0,17	-0,20
20/09/2009	15:00	0,13	26,3	25,2	24,2	25,2	0,01	-0,17	-0,18
21/09/2009	15:00	0,03	22,5	22,1	21,6	22,1	-0,02	-0,27	-0,25
22/09/2009	15:00	0,13	24,2	24,1	23,4	23,9	-0,01	-0,17	-0,16
23/09/2009	15:00	0,05	22	21,9	21,7	21,9	-0,03	-0,25	-0,22
24/09/2009	15:00	-0,12	19,7	18,9	18,6	19,1	-0,05	-0,42	-0,37
25/09/2009	15:00	0,82	32,6	30,4	28	30,3	0,05	0,52	0,47
22/10/2009	15:00	0,68	29,1	29,8	29,2	29,4	0,04	0,38	0,34
23/10/2009	15:00	0,94	35,4	36,3	33,9	35,2	0,10	0,64	0,54
24/10/2009	15:00	1,13	36,3	37	35,4	36,2	0,11	0,83	0,72
25/10/2009	15:00	0,82	34,2	33,2	31,6	33,0	0,08	0,52	0,44
26/10/2009	15:00	0,81	33,9	32,9	31	32,6	0,07	0,51	0,44
27/10/2009	15:00	0,2	28,5	26,8	25,8	27,0	0,02	-0,10	-0,12
28/10/2009	15:00	0,17	26,5	26	25,1	25,9	0,01	-0,13	-0,14
29/10/2009	15:00	0,81	33,3	31,8	30,1	31,7	0,07	0,51	0,44
30/10/2009	15:00	0,82	34,9	34,5	32,3	33,9	0,09	0,52	0,43
31/10/2009	15:00	0,82	35	35,4	33,6	34,7	0,09	0,52	0,43
01/11/2009	15:00	0,95	37,9	35,9	33,9	35,9	0,11	0,65	0,54
02/11/2009	15:00	1,22	38	38,6	36,4	37,7	0,12	0,92	0,80
03/11/2009	15:00	1,08	37,9	37,6	36,2	37,2	0,12	0,78	0,66
04/11/2009	15:00	1,38	41	29,8	37,1	36,0	0,11	1,08	0,97
05/11/2009	15:00	1,04	37,9	38	36	37,3	0,12	0,74	0,62
11/11/2009	15:00	0,2	29	28,2	26,9	28,0	0,03	-0,10	-0,13
12/11/2009	15:00	0,88	37,6	36,4	34,2	36,1	0,11	0,58	0,47
13/11/2009	15:00	0,9	37,7	36,5	34,5	36,2	0,11	0,60	0,49
14/11/2009	15:00	0,93	38,1	37,6	36,1	37,3	0,12	0,63	0,51
15/11/2009	15:00	0,73	33,5	33,7	32,4	33,2	0,08	0,43	0,35
16/11/2009	15:00	0,56	32,3	31,2	29,5	31,0	0,06	0,26	0,20
17/11/2009	15:00	0,73	32	32,8	31,6	32,1	0,07	0,43	0,36
18/11/2009	15:00	0,95	38	36,4	34,3	36,2	0,11	0,65	0,54
19/11/2009	15:00	1,11	39,1	38,1	36,7	38,0	0,12	0,81	0,69
20/11/2009	15:00	0,72	35,8	34,7	33,6	34,7	0,09	0,42	0,33
21/11/2009	15:00	0,93	37,8	36,5	34,7	36,3	0,11	0,63	0,52
22/11/2009	15:00	0,82	33,6	33,8	32,9	33,4	0,08	0,52	0,44
28/11/2009	15:00	0,56	31,1	30,3	29,7	30,4	0,05	0,26	0,21
29/11/2009	15:00	0,42	30	29,1	28,4	29,2	0,04	0,12	0,08
30/11/2009	15:00	0,82	33,9	34,8	33,7	34,1	0,09	0,52	0,43
07/12/2009	15:00	0,20	27,9	28,1	27,2	27,7	0,03	-0,10	-0,13
08/12/2009	15:00	0,12	23,3	23,2	23	23,2	-0,01	-0,18	-0,17
09/12/2009	15:00	0,13	26	25,1	24,6	25,2	0,01	-0,17	-0,18
10/12/2009	15:00	0,87	34,9	33,6	31,5	33,3	0,08	0,57	0,49
11/12/2009	15:00	0,58	31,3	31,2	30	30,8	0,06	0,28	0,22
12/12/2009	15:00	0,82	32,2	31,5	31	31,6	0,06	0,52	0,46
13/12/2009	15:00	-0,11	22,6	22,2	21,5	22,1	-0,02	-0,41	-0,39
14/12/2009	15:00	0,13	25,6	25,6	24,8	25,3	0,01	-0,17	-0,18

Data	Horário	D1	T1	T2	T3	T méd	Dilatação Térmica	Deslocamento Total	Deslocamento Real
15/12/2009	15:00	0,82	33,9	32,2	29,9	32,0	0,07	0,52	0,45
16/12/2009	15:00	0,13	27,3	27,1	25,9	26,8	0,02	-0,17	-0,19
17/12/2009	15:00	0,82	33,6	34	32,4	33,3	0,08	0,52	0,44
23/12/2009	15:00	0,82	35,7	36	34,3	35,3	0,10	0,52	0,42
24/12/2009	15:00	0,82	36,7	36	34,6	35,8	0,10	0,52	0,42
25/12/2009	15:00	0,82	35	34,2	32,1	33,8	0,09	0,52	0,43
26/12/2009	15:00	0,82	33,2	33,8	33,2	33,4	0,08	0,52	0,44
27/12/2009	15:00	0,65	32,4	32,6	32	32,3	0,07	0,35	0,28
28/12/2009	15:00	0,60	31,6	31,3	30,5	31,1	0,06	0,30	0,24
29/12/2009	15:00	0,41	30,7	30,8	30	30,5	0,05	0,11	0,06
30/12/2009	15:00	0,81	32,8	33,9	33	33,2	0,08	0,51	0,43
31/12/2009	15:00	0,73	34	31,8	30,5	32,1	0,07	0,43	0,36
01/01/2010	15:00	0,01	22,8	22,7	22,3	22,6	-0,02	-0,29	-0,27
02/01/2010	15:00	0,82	36,6	35	33,1	34,9	0,10	0,52	0,42
03/01/2010	15:00	0,94	36,8	37,3	35,7	36,6	0,11	0,64	0,53
04/01/2010	15:00	0,92	37,3	38	36,3	37,2	0,12	0,62	0,50
05/01/2010	15:00	0,85	37,8	36,5	34,3	36,2	0,11	0,55	0,44
06/01/2010	15:00	0,73	31,9	33,2	32,5	32,5	0,07	0,43	0,36
07/01/2010	15:00	0,82	36	35,1	33,6	34,9	0,10	0,52	0,42
08/01/2010	15:00	0,82	36,6	35,1	33,3	35,0	0,10	0,52	0,42
09/01/2010	15:00	0,82	37,8	36,5	34,6	36,3	0,11	0,52	0,41
10/01/2010	15:00	0,82	37,3	35,5	34,6	35,8	0,10	0,52	0,42
11/01/2010	15:00	0,82	36,9	36,6	35,2	36,2	0,11	0,52	0,41
12/01/2010	15:00	0,13	28,2	28,4	27,7	28,1	0,03	-0,17	-0,20
13/01/2010	15:00	0,78	33,3	33,2	32,1	32,9	0,08	0,48	0,40
14/01/2010	15:00	0,75	32,8	33,9	32,9	33,2	0,08	0,45	0,37
28/01/2010	15:00	0,13	27,5	27,7	26,8	27,3	0,03	-0,17	-0,20
29/01/2010	15:00	0,17	27,5	27,1	26,4	27,0	0,02	-0,13	-0,15
30/01/2010	15:00	0,13	29,4	28,8	27,9	28,7	0,04	-0,17	-0,21
31/01/2010	15:00	0,56	31,7	31,2	29,8	30,9	0,06	0,26	0,20
01/02/2010	15:00	0,88	35,8	35,9	34,4	35,4	0,10	0,58	0,48
02/02/2010	15:00	0,85	36,6	36,5	35,1	36,1	0,11	0,55	0,44
03/02/2010	15:00	0,82	36,2	36,4	35	35,9	0,10	0,52	0,42
04/02/2010	15:00	0,85	36,6	36,2	35	35,9	0,11	0,55	0,44
05/02/2010	15:00	0,92	37,5	35,8	33,5	35,6	0,10	0,62	0,52
06/02/2010	15:00	0,88	37,4	38	36,3	37,2	0,12	0,58	0,46
07/02/2010	15:00	0,82	36,5	35,5	33,6	35,2	0,10	0,52	0,42
08/02/2010	15:00	0,82	36,5	35,1	34	35,2	0,10	0,52	0,42
09/02/2010	15:00	0,18	30,8	30,8	29,8	30,5	0,05	-0,12	-0,17
10/02/2010	15:00	0,07	26,2	26,3	25,7	26,1	0,01	-0,23	-0,24
11/02/2010	15:00	0,85	37,4	36,6	34,5	36,2	0,11	0,55	0,44
12/02/2010	15:00	0,82	36,6	35,9	34,1	35,5	0,10	0,52	0,42
13/02/2010	15:00	0,83	38	36,9	35,1	36,7	0,11	0,53	0,42
14/02/2010	15:00	0,93	39,6	38,3	35,8	37,9	0,12	0,63	0,51
15/02/2010	15:00	0,88	40,2	38,9	36,4	38,5	0,13	0,58	0,45
16/02/2010	15:00	0,82	37,7	37,7	36	37,1	0,12	0,52	0,40
17/02/2010	15:00	0,82	34,6	36,2	34,7	35,2	0,10	0,52	0,42
18/02/2010	15:00	0,13	27,1	27,1	26,5	26,9	0,02	-0,17	-0,19
11/03/2010	15:00	0,95	38,9	39,2	37,5	38,5	0,13	0,65	0,52
12/03/2010	15:00	1,3	42,4	40,4	38,7	40,5	0,15	1,00	0,85
13/03/2010	15:00	1,42	41,4	43,5	41,2	42,0	0,16	1,12	0,96
14/03/2010	15:00	0,81	36,4	36,1	34,9	35,8	0,10	0,51	0,41
15/03/2010	15:00	0,25	30,4	31,9	31	31,1	0,06	-0,05	-0,11
16/03/2010	15:00	0,61	35,1	32,8	31,2	33,0	0,08	0,31	0,23
17/03/2010	15:00	0,04	27,3	26,2	24,9	26,1	0,01	-0,26	-0,27
18/03/2010	15:00	0,82	35,1	37,4	35,1	35,9	0,10	0,52	0,42
19/03/2010	15:00	1,41	46	42,5	38,4	42,3	0,16	1,11	0,95
20/03/2010	15:00	1,1	39	40,3	38,2	39,2	0,14	0,80	0,66
21/03/2010	15:00	0,83	38	37,9	34,4	36,8	0,11	0,53	0,42
22/03/2010	15:00	1,14	39,6	40,1	38,2	39,3	0,14	0,84	0,70

Tabela 10: Leituras e deslocamentos 6h00 – aparato de medição com LVDT

Data	Horário	D2	T4	T5	T6	T méd	Dilatação Térmica	Deslocamento Total	Deslocamento Real
24/08/2009						19,3			0,00
25/08/2009	6:00	-0,73	18,9	18,9	18,9	18,9	0,00	0,03	0,03
26/08/2009	6:00	-0,74	18,8	19,0	18,9	18,9	0,00	0,02	0,02
27/08/2009	6:00	-0,68	20,9	21,0	20,7	20,9	0,01	0,08	0,07
28/08/2009	6:00	-0,65	22,0	22,1	21,6	21,9	0,02	0,11	0,09
29/08/2009	6:00	-0,63	22	22,2	21,9	22,0	0,02	0,13	0,11
30/08/2009	6:00	-0,61	22,8	23	22,5	22,8	0,03	0,15	0,12
31/08/2009	6:00	-0,6	23	23,2	22,8	23,0	0,03	0,16	0,13
01/09/2009	6:00	-0,57	23,9	24,1	23,7	23,9	0,03	0,19	0,16
02/09/2009	6:00	-0,57	23,8	24	23,6	23,8	0,03	0,19	0,16
03/09/2009	6:00	-0,53	24,8	24,9	24,6	24,8	0,04	0,23	0,19
04/09/2009	6:00	-0,57	24,4	23,8	23,7	24,0	0,03	0,19	0,16
12/09/2009	6:00	-0,59	24,1	24,2	23,8	24,0	0,03	0,17	0,14
13/09/2009	6:00	-0,56	24,8	24,9	24,4	24,7	0,04	0,20	0,16
14/09/2009	6:00	-0,55	25,5	25,5	25,2	25,4	0,04	0,21	0,17
15/09/2009	6:00	-0,58	22,9	23	22,7	22,9	0,03	0,18	0,15
16/09/2009	6:00	-0,59	23,5	23,5	23,2	23,4	0,03	0,17	0,14
17/09/2009	6:00	-0,57	24,5	24,5	24,1	24,4	0,04	0,19	0,15
18/09/2009	6:00	-0,58	24	24,1	23,7	23,9	0,03	0,18	0,15
19/09/2009	6:00	-0,59	23,9	24	23,7	23,9	0,03	0,17	0,14
20/09/2009	6:00	-0,58	23,7	23,8	23,5	23,7	0,03	0,18	0,15
21/09/2009	6:00	-0,59	23,5	23,6	23,3	23,5	0,03	0,17	0,14
22/09/2009	6:00	-0,63	21,5	21,4	21,2	21,4	0,02	0,13	0,11
23/09/2009	6:00	-0,64	21,9	22	21,7	21,9	0,02	0,12	0,10
24/09/2009	6:00	-0,67	21	21,2	21,1	21,1	0,01	0,09	0,08
25/09/2009	6:00	-0,67	20,1	20	19,9	20,0	0,01	0,09	0,08
23/10/2009	6:00	-0,58	24,4	24,5	24,2	24,4	0,04	0,18	0,14
24/10/2009	6:00	-0,55	25,6	25,7	25,3	25,5	0,05	0,21	0,16
25/10/2009	6:00	-0,52	26,2	26,3	25,9	26,1	0,05	0,24	0,19
26/10/2009	6:00	-0,52	26	26,1	25,7	25,9	0,05	0,24	0,19
27/10/2009	6:00	-0,55	24,2	23,9	23,9	24,0	0,03	0,21	0,18
28/10/2009	6:00	-0,58	23,8	23,9	23,5	23,7	0,03	0,18	0,15
30/10/2009	6:00	-0,57	24,5	24,6	24,2	24,4	0,04	0,19	0,15
31/10/2009	6:00	-0,53	26,1	26,2	25,7	26,0	0,05	0,23	0,18
01/11/2009	6:00	-0,48	27	27,1	26,6	26,9	0,06	0,28	0,22
02/11/2009	6:00	-0,47	27,3	27,4	27	27,2	0,06	0,29	0,23
03/11/2009	6:00	-0,45	27,8	27,8	27,2	27,6	0,06	0,31	0,25
04/11/2009	6:00	-0,43	28	28	27,3	27,8	0,06	0,33	0,27
05/11/2009	6:00	-0,41	28,9	29	28,5	28,8	0,07	0,35	0,28
06/11/2009	6:00	-0,41	28,5	28,5	28,1	28,4	0,07	0,35	0,28
11/11/2009	6:00	-0,45	27,3	27,4	27	27,2	0,06	0,31	0,25
12/11/2009	6:00	-0,46	26,6	26,7	26,4	26,6	0,05	0,30	0,25
13/11/2009	6:00	-0,44	27,9	28	27,6	27,8	0,06	0,32	0,26
14/11/2009	6:00	-0,41	29	29,1	28,7	28,9	0,07	0,35	0,28
15/11/2009	6:00	-0,38	29,7	29,9	29,4	29,7	0,08	0,38	0,30
16/11/2009	6:00	-0,45	26,7	27,1	27,1	27,0	0,06	0,31	0,25
17/11/2009	6:00	-0,46	26,5	26,5	26,2	26,4	0,05	0,30	0,25
18/11/2009	6:00	-0,46	27,4	27,5	27,1	27,3	0,06	0,30	0,24
19/11/2009	6:00	-0,42	28,8	29	28,5	28,8	0,07	0,34	0,27
20/11/2009	6:00	-0,38	30,3	30,4	29,9	30,2	0,08	0,38	0,30
21/11/2009	6:00	-0,45	26,5	27	26,7	26,7	0,05	0,31	0,26
22/11/2009	6:00	-0,46	24,4	26,5	26,4	25,8	0,05	0,30	0,25
23/11/2009	6:00	-0,47	27,2	27,2	26,9	27,1	0,06	0,29	0,23
28/11/2009	6:00	-0,5	26,1	26,2	25,9	26,1	0,05	0,26	0,21
29/11/2009	6:00	-0,52	25,8	25,5	25,4	25,6	0,05	0,24	0,19
30/11/2009	6:00	-0,51	26,3	26,2	25,9	26,1	0,05	0,25	0,20
08/12/2009	6:00	-0,54	25,2	25	24,8	25,0	0,04	0,22	0,18
09/12/2009	6:00	-0,57	24,1	23,9	23,6	23,9	0,03	0,19	0,16

Data	Horário	D2	T4	T5	T6	T méd	Dilatação Térmica	Deslocamento Total	Deslocamento Real
10/12/2009	6:00	-0,58	24,2	24,1	23,8	24,0	0,03	0,18	0,15
11/12/2009	6:00	-0,56	25,2	25,2	24,8	25,1	0,04	0,20	0,16
12/12/2009	6:00	-0,58	25,1	25,2	24,8	25,0	0,04	0,18	0,14
13/12/2009	6:00	-0,59	25,7	25,1	24,8	25,2	0,04	0,17	0,13
14/12/2009	6:00	-0,59	23,1	22,9	22,7	22,9	0,03	0,17	0,14
15/12/2009	6:00	-0,61	23,5	23,3	23,1	23,3	0,03	0,15	0,12
16/12/2009	6:00	-0,57	25,5	25,5	25,2	25,4	0,04	0,19	0,15
17/12/2009	6:00	-0,57	25,1	25,1	24,6	24,9	0,04	0,19	0,15
18/12/2009	6:00	-0,59	24	24,1	23,7	23,9	0,03	0,17	0,14
24/12/2009	6:00	-0,46	28,2	28,3	27,9	28,1	0,06	0,30	0,24
25/12/2009	6:00	-0,51	26,3	26,6	26,3	26,4	0,05	0,25	0,20
26/12/2009	6:00	-0,52	26,2	26,6	26,4	26,4	0,05	0,24	0,19
27/12/2009	6:00	-0,5	27,3	27,5	27,2	27,3	0,06	0,26	0,20
28/12/2009	6:00	-0,52	26,6	26,8	26,4	26,6	0,05	0,24	0,19
29/12/2009	6:00	-0,53	26,6	26,5	26,2	26,4	0,05	0,23	0,18
30/12/2009	6:00	-0,51	27,6	27,5	27,2	27,4	0,06	0,25	0,19
31/12/2009	6:00	-0,55	25,5	26	25,7	25,7	0,05	0,21	0,16
01/01/2010	6:00	-0,54	26,9	26,9	26,5	26,8	0,05	0,22	0,17
02/01/2010	6:00	-0,57	24,8	24,6	24,4	24,6	0,04	0,19	0,15
03/01/2010	6:00	-0,54	27,2	27,1	26,9	27,1	0,06	0,22	0,16
04/01/2010	6:00	-0,49	28,50	28,60	28,20	28,4	0,07	0,27	0,20
05/01/2010	6:00	-0,49	27,7	27,8	27,6	27,7	0,06	0,27	0,21
06/01/2010	6:00	-0,52	26,6	26,2	26	26,3	0,05	0,24	0,19
07/01/2010	6:00	-0,52	27,3	27,1	26,9	27,1	0,06	0,24	0,18
08/01/2010	6:00	-0,51	27,5	27,4	27,2	27,4	0,06	0,25	0,19
09/01/2010	6:00	-0,52	27,5	27,5	27	27,3	0,06	0,24	0,18
10/01/2010	6:00	-0,52	27,6	27,5	27,1	27,4	0,06	0,24	0,18
11/01/2010	6:00	-0,49	28,9	29	28,6	28,8	0,07	0,27	0,20
12/01/2010	6:00	-0,51	27,1	26,8	26,4	26,8	0,05	0,25	0,20
13/01/2010	6:00	-0,53	27,4	27,3	26,9	27,2	0,06	0,23	0,17
14/01/2010	6:00	-0,52	27,8	27,8	27,4	27,7	0,06	0,24	0,18
15/01/2010	6:00	-0,51	28,1	28,2	27,8	28,0	0,06	0,25	0,19
29/01/2010	6:00	-0,61	25	25	24,8	24,9	0,04	0,15	0,11
30/01/2010	6:00	-0,61	25,3	25,2	24,8	25,1	0,04	0,15	0,11
31/01/2010	6:00	-0,59	26	25,9	25,7	25,9	0,05	0,17	0,12
01/02/2010	6:00	-0,58	26,2	26,2	25,7	26,0	0,05	0,18	0,13
02/02/2010	6:00	-0,57	26,7	26,7	26,3	26,6	0,05	0,19	0,14
03/02/2010	6:00	-0,53	27,4	27,4	26,9	27,2	0,06	0,23	0,17
04/02/2010	6:00	-0,55	27	27	26,4	26,8	0,05	0,21	0,16
05/02/2010	6:00	-0,54	26,9	26,9	26,6	26,8	0,05	0,22	0,17
06/02/2010	6:00	-0,49	28,9	29	28,5	28,8	0,07	0,27	0,20
07/02/2010	6:00	-0,49	28,6	28,6	28,2	28,5	0,07	0,27	0,20
08/02/2010	6:00	-0,45	29,8	30	29,5	29,8	0,08	0,31	0,23
09/02/2010	6:00	-0,43	30,3	30,5	30,1	30,3	0,08	0,33	0,25
10/02/2010	6:00	-0,48	27,4	27,5	27,1	27,3	0,06	0,28	0,22
11/02/2010	6:00	-0,53	26,3	26,2	26	26,2	0,05	0,23	0,18
12/02/2010	6:00	-0,53	27,3	27,2	26,8	27,1	0,06	0,23	0,17
13/02/2010	6:00	-0,49	28,9	29	28,6	28,8	0,07	0,27	0,20
14/02/2010	6:00	-0,43	30,4	30,5	30	30,3	0,08	0,33	0,25
15/02/2010	6:00	-0,42	30,8	31	30,6	30,8	0,08	0,34	0,26
16/02/2010	6:00	-0,43	29,4	29,6	29,2	29,4	0,07	0,33	0,26
17/02/2010	6:00	-0,46	29,2	29,3	28,8	29,1	0,07	0,30	0,23
18/02/2010	6:00	-0,5	26,9	26,9	26,7	26,8	0,05	0,26	0,21
19/02/2010	6:00	-0,54	26,5	26,3	26,1	26,3	0,05	0,22	0,17
12/03/2010	6:00	-0,51	28,2	28,4	27,9	28,2	0,06	0,25	0,19
13/03/2010	6:00	-0,5	28,2	28,4	27,9	28,2	0,06	0,26	0,20
14/03/2010	6:00	-0,47	29,3	29,5	29,1	29,3	0,07	0,29	0,22
15/03/2010	6:00	-0,48	28,1	28,2	27,9	28,1	0,06	0,28	0,22
16/03/2010	6:00	-0,52	27,5	27,6	27,3	27,5	0,06	0,24	0,18
17/03/2010	6:00	-0,54	26,9	26,9	26,6	26,8	0,05	0,22	0,17
18/03/2010	6:00	-0,58	25,5	25,5	25,1	25,4	0,04	0,18	0,14
19/03/2010	6:00	-0,56	26,9	27	26,7	26,9	0,06	0,20	0,14
20/03/2010	6:00	-0,55	26,7	26,7	26,3	26,6	0,05	0,21	0,16

Data	Horário	D2	T4	T5	T6	T méd	Dilatação Térmica	Deslocamento Total	Deslocamento Real
21/03/2010	6:00	-0,54	27,1	27,2	26,9	27,1	0,06	0,22	0,16
22/03/2010	6:00	-0,58	26,4	26,3	26	26,2	0,05	0,18	0,13
23/03/2010	6:00	-0,56	27,1	27,1	26,8	27,0	0,06	0,20	0,14

Tabela 11: Leituras e deslocamentos 15h00 – aparato de medição com LVDT

Data	Horário	D2	T4	T5	T6	T méd	Dilatação Térmica	Deslocamento Total	Deslocamento Real
24/08/2009						19,3			0,00
25/08/2009	15:00	-0,76	19,6	19,6	19,5	19,6	0,00	0	0,00
26/08/2009	15:00	-0,81	20,2	20,3	20	20,2	0,01	-0,05	-0,06
27/08/2009	15:00	-0,8	21,5	21,6	21,2	21,4	0,02	-0,04	-0,06
29/08/2009	15:00	-0,75	22,7	22,8	22,5	22,7	0,02	0,01	-0,01
30/08/2009	15:00	-0,72	23,4	23,5	23,1	23,3	0,03	0,04	0,01
31/08/2009	15:00	-0,7	23,8	24	23,6	23,8	0,03	0,06	0,03
01/09/2009	15:00	-0,67	24,6	24,8	24,4	24,6	0,04	0,09	0,05
02/09/2009	15:00	-0,67	24,9	25,1	24,7	24,9	0,04	0,09	0,05
03/09/2009	15:00	-0,64	25,7	25,9	25,4	25,7	0,05	0,12	0,07
12/09/2009	15:00	-0,67	25,1	25,2	24,7	25,0	0,04	0,09	0,05
13/09/2009	15:00	-0,67	25,5	25,7	25,3	25,5	0,05	0,09	0,04
14/09/2009	15:00	-0,59	24	23,9	23,6	23,8	0,03	0,17	0,14
15/09/2009	15:00	-0,67	23,8	23,9	23,5	23,7	0,03	0,09	0,06
16/09/2009	15:00	-0,7	24,3	24,4	23,9	24,2	0,04	0,06	0,02
17/09/2009	15:00	-0,64	24,9	25	24,6	24,8	0,04	0,12	0,08
19/09/2009	15:00	-0,61	24,6	24,7	24,3	24,5	0,04	0,15	0,11
20/09/2009	15:00	-0,63	24,5	24,5	24,3	24,4	0,04	0,13	0,09
21/09/2009	15:00	-0,62	23,1	23,1	22,9	23,0	0,03	0,14	0,11
22/09/2009	15:00	-0,67	22,1	22,1	21,8	22,0	0,02	0,09	0,07
23/09/2009	15:00	-0,68	21,8	21,5	21,7	21,7	0,02	0,08	0,06
24/09/2009	15:00	-0,69	20,8	20,9	20,7	20,8	0,01	0,07	0,06
25/09/2009	15:00	-0,76	21,6	21,7	21,3	21,5	0,02	0	-0,02
22/10/2009	15:00	-0,6	25,1	24,9	24,9	25,0	0,04	0,16	0,12
23/10/2009	15:00	-0,61	25,5	25,7	25,3	25,5	0,05	0,15	0,10
24/10/2009	15:00	-0,58	26,4	26,5	26	26,3	0,05	0,18	0,13
25/10/2009	15:00	-0,57	26,6	26,7	26,3	26,5	0,05	0,19	0,14
26/10/2009	15:00	-0,54	26,8	26,9	26,4	26,7	0,05	0,22	0,17
27/10/2009	15:00	-0,61	24,6	24,3	24,3	24,4	0,04	0,15	0,11
28/10/2009	15:00	-0,61	24,1	24,1	23,8	24,0	0,03	0,15	0,12
29/10/2009	15:00	-0,63	24,7	24,9	24,5	24,7	0,04	0,13	0,09
30/10/2009	15:00	-0,61	25,4	25,6	25,2	25,4	0,04	0,15	0,11
31/10/2009	15:00	-0,55	27	27,1	26,6	26,9	0,06	0,21	0,15
01/11/2009	15:00	-0,51	27,6	27,7	27,3	27,5	0,06	0,25	0,19
02/11/2009	15:00	-0,49	28	28,2	27,8	28,0	0,06	0,27	0,21
03/11/2009	15:00	-0,47	28,5	28,7	28,2	28,5	0,07	0,29	0,22
04/11/2009	15:00	-0,45	28,8	29	28,4	28,7	0,07	0,31	0,24
05/11/2009	15:00	-0,43	29,4	29,5	29,1	29,3	0,07	0,33	0,26
11/11/2009	15:00	-0,47	27,8	27,9	27,8	27,8	0,06	0,29	0,23
12/11/2009	15:00	-0,49	27,9	28,1	27,6	27,9	0,06	0,27	0,21
13/11/2009	15:00	-0,47	28,8	29	28,6	28,8	0,07	0,29	0,22
14/11/2009	15:00	-0,44	29,9	30	29,5	29,8	0,08	0,32	0,24
15/11/2009	15:00	-0,42	30	30,1	29,7	29,9	0,08	0,34	0,26
16/11/2009	15:00	-0,54	26,5	27,3	27,5	27,1	0,06	0,22	0,16
17/11/2009	15:00	-0,5	27,5	27,6	27,2	27,4	0,06	0,26	0,20
18/11/2009	15:00	-0,47	28,2	28,4	28	28,2	0,06	0,29	0,23
19/11/2009	15:00	-0,44	29,8	29,8	29,3	29,6	0,08	0,32	0,24

Data	Horário	D2	T4	T5	T6	T méd	Dilatação Térmica	Deslocamento Total	Deslocamento Real
20/11/2009	15:00	-0,37	31	31,2	30,8	31,0	0,09	0,39	0,30
21/11/2009	15:00	-0,53	27,4	28,1	27,6	27,7	0,06	0,23	0,17
22/11/2009	15:00	-0,54	27,3	27,4	27,3	27,3	0,06	0,22	0,16
28/11/2009	15:00	-0,59	26,1	26,3	26	26,1	0,05	0,17	0,12
29/11/2009	15:00	-0,56	25,8	25,6	25,5	25,6	0,05	0,2	0,15
30/11/2009	15:00	-0,53	27,5	27,5	27,3	27,4	0,06	0,23	0,17
07/12/2009	15:00	-0,57	25,4	25,3	25,1	25,3	0,04	0,19	0,15
08/12/2009	15:00	-0,56	24,3	24,3	24,1	24,2	0,04	0,20	0,16
09/12/2009	15:00	-0,63	24,3	24	23,9	24,1	0,03	0,13	0,10
10/12/2009	15:00	-0,61	25,5	25,5	25,2	25,4	0,04	0,15	0,11
11/12/2009	15:00	-0,57	26	26,2	25,8	26,0	0,05	0,19	0,14
12/12/2009	15:00	-0,63	25,5	25,9	25,3	25,6	0,05	0,13	0,08
13/12/2009	15:00	-0,6	24,4	23,8	23,7	24,0	0,03	0,16	0,13
14/12/2009	15:00	-0,63	23,4	23,3	23,1	23,3	0,03	0,13	0,10
15/12/2009	15:00	-0,62	24,9	24,9	24,6	24,8	0,04	0,14	0,10
16/12/2009	15:00	-0,59	26,1	26,1	25,8	26,0	0,05	0,17	0,12
17/12/2009	15:00	-0,61	26	26,2	25,8	26,0	0,05	0,15	0,10
23/12/2009	15:00	-0,46	29	29,2	28,8	29,0	0,07	0,30	0,23
24/12/2009	15:00	-0,47	29,2	29,5	29	29,2	0,07	0,29	0,22
25/12/2009	15:00	-0,55	27,4	27,7	27,4	27,5	0,06	0,21	0,15
26/12/2009	15:00	-0,57	27	27,8	27,6	27,5	0,06	0,19	0,13
27/12/2009	15:00	-0,5	28,6	28,7	28,4	28,6	0,07	0,26	0,19
28/12/2009	15:00	-0,59	26,6	26,8	26,7	26,7	0,05	0,17	0,12
29/12/2009	15:00	-0,6	27	26,9	26,8	26,9	0,06	0,16	0,10
30/12/2009	15:00	-0,53	28,4	28,5	28,3	28,4	0,07	0,23	0,16
31/12/2009	15:00	-0,6	26,2	26,6	26,4	26,4	0,05	0,16	0,11
01/01/2010	15:00	-0,56	25,2	25,2	25	25,1	0,04	0,20	0,16
02/01/2010	15:00	-0,6	26,6	26,5	26,3	26,5	0,05	0,16	0,11
03/01/2010	15:00	-0,52	28,30	28,40	28,10	28,3	0,07	0,24	0,17
04/01/2010	15:00	-0,48	29,3	29,5	29	29,3	0,07	0,28	0,21
05/01/2010	15:00	-0,5	28,9	29,1	28,7	28,9	0,07	0,26	0,19
06/01/2010	15:00	-0,54	27,7	27,6	27,5	27,6	0,06	0,22	0,16
07/01/2010	15:00	-0,55	28	28	27,7	27,9	0,06	0,21	0,15
08/01/2010	15:00	-0,52	28,2	28,4	28	28,2	0,06	0,24	0,18
09/01/2010	15:00	-0,51	28,6	28,8	28,3	28,6	0,07	0,25	0,18
10/01/2010	15:00	-0,51	28,9	29	28,5	28,8	0,07	0,25	0,18
11/01/2010	15:00	-0,46	30	30,1	29,7	29,9	0,08	0,30	0,22
12/01/2010	15:00	-0,54	27,7	27,7	27,4	27,6	0,06	0,22	0,16
13/01/2010	15:00	-0,5	28,5	28,7	28,3	28,5	0,07	0,26	0,19
14/01/2010	15:00	-0,52	28,6	28,8	28,5	28,6	0,07	0,24	0,17
28/01/2010	15:00	-0,61	26,1	26	25,8	26,0	0,05	0,15	0,10
29/01/2010	15:00	-0,63	25,3	25,3	25,1	25,2	0,04	0,13	0,09
30/01/2010	15:00	-0,63	26	25,9	25,6	25,8	0,05	0,13	0,08
31/01/2010	15:00	-0,59	26,6	26,7	26,4	26,6	0,05	0,17	0,12
01/02/2010	15:00	-0,57	27,2	27,3	26,9	27,1	0,06	0,19	0,13
02/02/2010	15:00	-0,55	27,7	27,8	27,4	27,6	0,06	0,21	0,15
03/02/2010	15:00	-0,53	28,2	28,3	27,9	28,1	0,06	0,23	0,17
04/02/2010	15:00	-0,54	28	28,1	27,6	27,9	0,06	0,22	0,16
05/02/2010	15:00	-0,54	27,8	27,9	27,4	27,7	0,06	0,22	0,16
06/02/2010	15:00	-0,48	29,4	29,5	29	29,3	0,07	0,28	0,21
07/02/2010	15:00	-0,48	29,2	29,4	29	29,2	0,07	0,28	0,21
08/02/2010	15:00	-0,44	30,4	30,5	29,9	30,3	0,08	0,32	0,24
09/02/2010	15:00	-0,46	29,8	29,5	29,5	29,6	0,07	0,30	0,23
10/02/2010	15:00	-0,55	26,5	26,9	26,7	26,7	0,05	0,21	0,16
11/02/2010	15:00	-0,57	27,5	27,5	27,1	27,4	0,06	0,19	0,13
12/02/2010	15:00	-0,54	28,2	28,4	27,9	28,2	0,06	0,22	0,16
13/02/2010	15:00	-0,5	29,6	29,7	29,2	29,5	0,07	0,26	0,19
14/02/2010	15:00	-0,44	30,6	30,8	30,3	30,6	0,08	0,32	0,24
15/02/2010	15:00	-0,42	31,2	31,3	30,8	31,1	0,09	0,34	0,25
16/02/2010	15:00	-0,45	30,2	30,3	29,9	30,1	0,08	0,31	0,23
17/02/2010	15:00	-0,49	29,7	30	29,6	29,8	0,08	0,27	0,19

Data	Horário	D2	T4	T5	T6	T méd	Dilatação Térmica	Deslocamento Total	Deslocamento Real
18/02/2010	15:00	-0,54	26,6	26,6	26,4	26,5	0,05	0,22	0,17
11/03/2010	15:00	-0,58	28,6	28,8	28,3	28,6	0,07	0,18	0,11
12/03/2010	15:00	-0,58	29,2	29,3	28,7	29,1	0,07	0,18	0,11
13/03/2010	15:00	-0,57	29,2	29,5	28,9	29,2	0,07	0,19	0,12
14/03/2010	15:00	-0,5	30,2	30,4	30	30,2	0,08	0,26	0,18
15/03/2010	15:00	-0,58	27,4	26,7	26,8	27,0	0,06	0,18	0,12
16/03/2010	15:00	-0,57	28	28,1	27,7	27,9	0,06	0,19	0,13
17/03/2010	15:00	-0,66	25,5	25,3	24,6	25,1	0,04	0,10	0,06
18/03/2010	15:00	-0,64	26,7	26,8	26,4	26,6	0,05	0,12	0,07
19/03/2010	15:00	-0,62	28,1	28,2	27,8	28,0	0,06	0,14	0,08
20/03/2010	15:00	-0,62	27,6	27,8	27,4	27,6	0,06	0,14	0,08
21/03/2010	15:00	-0,66	26,8	26,7	26,4	26,6	0,05	0,10	0,05
22/03/2010	15:00	-0,63	27,5	27,6	27,3	27,5	0,06	0,13	0,07