

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

Maiko Fernandes Buzzi

AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES DE SÉRIES TEMPORAIS DE
LEITURAS DE INSTRUMENTOS DE MONITORAÇÃO GEOTÉCNICO-
ESTRUTURAL E VARIÁVEIS AMBIENTAIS EM BARRAGENS
ESTUDO DE CASO DE ITAIPU

CURITIBA

2007

AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES DE SÉRIES TEMPORAIS DE
LEITURAS DE INSTRUMENTOS DE MONITORAÇÃO GEOTÉCNICO-
ESTRUTURAL E VARIÁVEIS AMBIENTAIS EM BARRAGENS
ESTUDO DE CASO DE ITAIPU

CURITIBA

2007

MAIKO FERNANDES BUZZI

**AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES DE SÉRIES TEMPORAIS DE
LEITURAS DE INSTRUMENTOS DE MONITORAÇÃO GEOTÉCNICO-
ESTRUTURAL E VARIÁVEIS AMBIENTAIS EM BARRAGENS
ESTUDO DE CASO DE ITAIPU**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Área Mecânica Computacional. Setores de Tecnologia e Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.
Orientadora: Prof. Dr. Andrea Dyminski
Co-Orientador: Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto

CURITIBA

2007

TERMO DE APROVAÇÃO**MAIKO FERNANDES BUZZI****AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES DE SÉRIES TEMPORAIS DE LEITURAS DE
INSTRUMENTOS DE MONITORAÇÃO GEOTÉCNICO-ESTRUTURAL E VARIÁVEIS
AMBIENTAIS EM BARRAGENS - ESTUDO DE CASO DE ITAIPU**

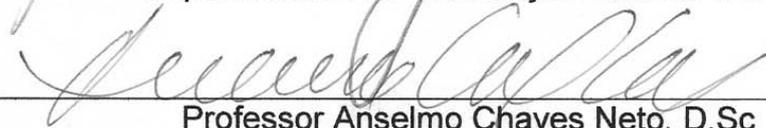
Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências, na Área de Concentração em Mecânica Computacional, do Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

Orientador:

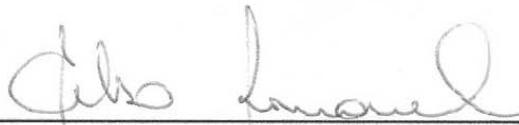


Professora Andrea Dyminski, D. Sc Eng.
Departamento de Construção Civil da UFPR

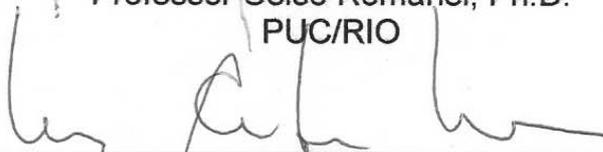
Co-Orientador



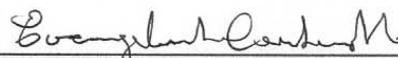
Professor Anselmo Chaves Neto, D.Sc
Departamento de Estatística da UFPR



Professor Celso Romanel, Ph.D.
PUC/RIO



Professor Marcos Antonio Marino, Ph.D.
Departamento de Construção Civil da UFPR



Professor Evangelista Caetano Porto, Dr.
ITAIPU - PR

Curitiba, 9 de abril de 2007

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir que eu chegasse até aqui.

A minha orientadora, Andréa Sell Dyminski, pela orientação, pelo incentivo constante, pela dedicação, pelos conhecimentos transmitidos durante esse curso de mestrado, pela confiança depositada em meu trabalho e principalmente pela oportunidade de estudar e desenvolver esta dissertação.

Ao meu co-orientador, Anselmo Chaves, sempre com disposição para sanar dúvidas que iam surgindo no decorrer do trabalho.

Aos meus colegas de projeto AIVEC, Neile, Pablo e Rosângela, que mesmo tendo seus objetivos individuais, doaram parte de seu tempo para me ajudar nesse trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Itaipu Binacional, pelo apoio incondicional e por permitir total acesso aos dados instrumentais da barragem apresentados neste trabalho.

Aos funcionários do CESEC, principalmente à Maristela, dona de uma disposição e simpatia singular.

Aos colegas de curso da UFPR, com os quais compartilhei inesquecíveis experiências acadêmicas e de vida.

Ao CNPQ e a FINEP, pelos auxílios concedidos, fundamentais para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

RESUMO

A correta interpretação de dados advindos de instrumentos de auscultação instalados em barragens é fundamental para o entendimento do comportamento destas obras e verificação de sua segurança. Neste trabalho, propõe-se uma metodologia, baseada em correlações estatísticas, para o entendimento das interações existentes entre as séries temporais de leituras de instrumentos de monitoração geotécnico-estrutural instalados em barragens. Também se analisou a influência que a temperatura ambiente exerce sobre as leituras destes instrumentos, visando-se estimar o atraso no tempo de resposta dos instrumentos à ocorrência de mudanças nos parâmetros ambientais, tais como picos de temperatura. A metodologia proposta possibilita identificar anomalias em leituras de instrumentos e realizar a previsão ou recuperação de leituras. Como exemplo de aplicação estudaram-se as leituras de instrumentos instalados nos blocos F 19/20 da barragem de Itaipu, construída no Rio Paraná, na fronteira entre Brasil e Paraguai. Foram obtidos resultados interessantes e satisfatórios, permitindo quantificar correlações e intervalos de tempo relevantes à segurança da barragem.

Palavras-chave: Segurança de Barragens, Instrumentação Geotécnica-Estrutural, Séries Temporais, Análise de Correlação.

ABSTRACT

The correct interpretation of a dam monitoring system data is fundamental to understand and verify dam behavior and its safety. In this work, a methodology based on statistical correlations is proposed, in order to identify possible relationships between time-series composed of dam geotechnical-structural instrumentation readings. The influence of environmental temperature in the instruments readings is also evaluated allowing to estimate the delay of the instrument response to temperature changes, specially temperature peaks. The proposed methodology enables to identify instrument reading anomalies and to forecast or recover the readings. As an application of this methodology, the instruments installed in Itaipu Dam, Sector F, Blocks 19/20, have their readings analyzed. Satisfactory and interesting results are found, allowing to quantify correlations and time intervals that are relevant to the dam safety.

Key-words: Dam Safety, Geotechnical and Structural Instrumentation, Time-Series, Correlation Analysis.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO.....	vi
SUMÁRIO.....	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Organização do Trabalho.....	3
2. SEGURANÇA E INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS	5
2.1. Segurança de Barragens.....	5
2.2. Ocorrências de Acidentes e Incidentes em Barragens.....	8
2.3. Instrumentação de Barragens.....	11
2.4. Instrumentos de Auscultação de Barragens.....	13
2.4.1 Instrumentos usualmente instalados em estruturas de concreto de barragens:.....	15
2.4.2 Instrumentos usualmente instalados em fundações de barragens:.....	22
2.5. Frequência de Leitura dos Instrumentos de Auscultação	25
2.6. Aquisição e Processamento dos Dados da Instrumentação	26
3. ANÁLISE DE CORRELAÇÃO COM TESTE DE SIGNIFICÂNCIA	28
3.1 Introdução.....	28
3.2 Conceito Básico de Correlação Linear	28
3.3 Coeficiente de Correlação de Pearson.....	29
3.4. Coeficiente de Correlação Amostral.....	31
3.4.1 Teste da hipótese nula $\rho = 0$	32
3.4.2 Teste da hipótese $\rho = \rho_0 \neq 0$	32
4. METODOLOGIA.....	34
4.1. Introdução.....	34
4.2. Usina Hidrelétrica de Itaipu.....	34
4.3. Sistema de Monitoração Geotécnico-Estrutural da Usina Hidrelétrica de ITAIPU	35
4.4. Instrumentos e Período Analisados	38
4.5 Preparação dos Dados.....	39
4.6 Seleção, Agrupamento dos Dados e Cálculo de Correlações.....	43
4.6.1 Correlação direta entre dois instrumentos	44
4.6.2 Analisando a validade do agrupamento de leituras efetuadas em datas diferentes para o cálculo de correlação	46
4.7 Correlação entre leituras dos instrumentos e variáveis ambientais	50
5. RESULTADOS	53
5.1 Introdução.....	53
5.2 Análise de correlação entre instrumentos de mesmo tipo do bloco F19/20.....	53
5.3 Correlação entre eventos hidro-meteorológicos e leituras dos instrumentos dos blocos F19/20	62
5.3.1 Correlação de temperatura ambiente e leituras dos instrumentos	63

5.3.2 Correlação entre nível da água a montante e jusante e leituras dos instrumentos...	71
5.3.3 Correlações entre instrumentos de tipos diferentes	73
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	78
6.1 Conclusões.....	78
6.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXOS	85

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: RELAÇÕES ENTRE OS DIVERSOS INSTRUMENTOS E A DETERIORAÇÃO OBSERVADA NA BARRAGEM	14
FIGURA 2.2: ESQUEMA DE INSTALAÇÃO, PÊNDBULO DIRETO E INVERTIDO....	16
FIGURA 2.3: PÊNDBULO INVERTIDO.....	17
FIGURA 2.4: COORDINÔMETRO ÓTICO E SEUS COMPONENTES.....	18
FIGURA 2.5: BASE DE ALONGÂMETRO	19
FIGURA 2.6: PERFIL DE INSTALAÇÃO DAS ROSETAS DE DEFORMÍMETRO NA ESTRUTURA DE CONCRETO E A VISTA ESQUEMÁTICA DE UM MEDIDOR DE DEFORMAÇÃO TIPO CARLSON	20
FIGURA 2.7: VISTA ESQUEMÁTICA DE UM TENSÔMETRO PARA CONCRETO.	21
FIGURA 2.8 ESQUEMA DOS TERMÔMETROS TIPO CARLSON.	22
FIGURA 2.9: PERFIL DE INSTALAÇÃO DE UM EXTENSÔMETRO	23
FIGURA 2.10: PIEZÔMETRO DE TUBO ABERTO.....	24
FIGURA 3.1: AMOSTRAS DE (X,Y).....	29
FIGURA 3.2: AMOSTRAS DE (X,Y).....	31
FIGURA 4.1: PLANTA DO COMPLEXO ITAIPU.....	35
FIGURA 4.2: VISTA AÉREA DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU, CIRCULADO O TRECHO F.....	37
FIGURA 4.3: PARTE DE ARQUIVO TEXTO COM AS LEITURAS DO PÊNDBULO DIRETO COF21	40
FIGURA 4.4: PARTE DAS LEITURAS DOS INSTRUMENTOS JSF51 E JSF52.....	45
FIGURA 4.5: LEITURAS AGRUPADAS EM UMA ÚNICA MATRIZ PARA CÁLCULO DE CORRELAÇÃO	45
FIGURA 4.6: PARTE DAS LEITURAS DOS INSTRUMENTOS JSF51 E JSF52.....	47
FIGURA 4.7: LEITURAS AGRUPADAS EM UMA ÚNICA MATRIZ UTILIZANDO UMA TOLERÂNCIA DE UM DIA.....	47
FIGURA 4.8: EXEMPLO DE AGRUPAMENTO DE DADOS PARA O CÁLCULO DE CORRELAÇÃO ATRASADA.....	51
FIGURA 4.9: EXEMPLO DE AGRUPAMENTO DE DADOS PARA O CÁLCULO DE CORRELAÇÃO ATRASADA.....	52
FIGURA 5.1: SÉRIE HISTÓRICA DE LEITURAS DA BASE DE ALONGÂMETRO JSF52 - DESLIZAMENTO.....	55
FIGURA 5.2. SÉRIE HISTÓRICA DE LEITURAS DA BASE DE ALONGÂMETRO JSF54 - DESLIZAMENTO.....	55
FIGURA 5.3: LEITURAS DO INSTRUMENTO TNF21 SELECIONADO LEITURAS APROXIMADAMENTE IGUAIS.....	58

FIGURA 5.4: LEITURAS DO INSTRUMENTO TNF21 RETIRADO LEITURAS APROXIMADAMENTE IGUAIS.....	58
FIGURA 5.5: SÉRIE HISTÓRICA DAS LEITURAS DO INSTRUMENTO JIF15	60
FIGURA 5.6: SÉRIE DE LEITURA DO COORDINÔMETRO COF22 DO PÊNDULO DIRETO (AZUL DEMARCADO COM VERMELHO) E A TEMPERATURA AMBIENTE (AZUL DESBOTADO)	63
FIGURA 5.7: CORRELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DE DIAS ANTERIORES E O COORDINÔMETRO COF22	64
FIGURA 5.8: SÉRIE DE LEITURA DO COORDINÔMETRO COF22 (AZUL DEMARCADO COM VERMELHO) INVERTIDO E AVANÇADO EM 65 DIAS EM RELAÇÃO A TEMPERATURA AMBIENTE (AZUL CLARO).....	65
FIGURA 5.9: CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA ACUMULADA DE DIAS ANTERIORES E O COORDINÔMETRO COF22.....	66
FIGURA 5.10: SÉRIE DE LEITURAS DO COORDINÔMETRO COF22 (AZUL DEMARCADO COM VERMELHO) E A TEMPERATURA AMBIENTE (AZUL CLARO)	66
FIGURA 5.11: CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DE DIAS ANTERIORES E O COORDINÔMETRO COF22 - DIREÇÃO NORMAL AO FLUXO.....	67
FIGURA 5.12: CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA ACUMULADA DE DIAS ANTERIORES E O COORDINÔMETRO COF22 - DIREÇÃO NORMAL AO FLUXO	67
FIGURA 5.13: SÉRIE DE LEITURAS DO TENSÔMETRO SIMPLES TNF21 (AZUL DEMARCADO COM VERMELHO) E A TEMPERATURA AMBIENTE (AZUL DESBOTADO).....	68
FIGURA 5.14: CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DE DIAS ANTERIORES E O TENSÔMETRO SIMPLES.....	68
FIGURA 5.15: CORRELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA ACUMULADA DE DIAS ANTERIORES E O TENSÔMETRO SIMPLES	69
FIGURA 5.16: CORRELAÇÕES ENTRE A TENSÃO DO RTF26(3) E A TEMPERATURA DE DIAS ANTERIORES.....	70
FIGURA 5.17: CORRELAÇÕES ENTRE A TENSÃO DO RTF26(3) E A TEMPERATURA ACUMULADA DE DIAS ANTERIORES	70
FIGURA 5.18: COTA DO NÍVEL DA ÁGUA A MONTANTE.....	71
FIGURA 5.19: COTA DO NÍVEL DA ÁGUA A JUSANTE	72
FIGURA 5.20: CORRELAÇÕES ENTE NÍVEL DA ÁGUA A JUSANTE ACUMULADO DE DIAS ANTERIORES COM O PSF72.....	73
FIGURA 5.21: CORTE LATERAL DO BLOCO F 19/20	75
FIGURA 5.22: VALOR PREDITO PELO MODELO X OBSERVADO.....	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: NÚMERO DE ACIDENTES OCORRIDOS EM BARRAGENS.....	9
TABELA 2.2: NÚMERO DE ACIDENTES OCORRIDOS EM BARRAGENS NO DECORRER DO TEMPO.....	9
TABELA 2.3: NÚMERO DE ACIDENTES OCORRIDOS EM DIFERENTES TIPOS DE BARRAGENS.....	10
TABELA 2.4: FREQUÊNCIAS MÍNIMAS DE LEITURA EM BARRAGENS DE CONCRETO, SEGUNDO ICOLD.....	26
TABELA 4.1: NÚMERO DE INSTRUMENTOS NOS BLOCOS DO TRECHO F – CONCRETO.....	37
TABELA 4.2: NÚMERO DE INSTRUMENTOS NOS BLOCOS DO TRECHO F – FUNDAÇÃO.....	38
TABELA 4.3: ROSETAS DE TENSÔMETRO NOS BLOCOS F 19.....	40
TABELA 4.4: ROSETAS DE TENSÔMETRO NOS BLOCOS F 19.....	41
TABELA 4.5: BASES DE ALONGÂMETRO NA PAREDE PRESENTE NOS BLOCOS F 19/20.....	41
TABELA 4.6: BASES DE ALONGÂMETRO NA PAREDE PRESENTE NOS BLOCOS F 19/20.....	41
TABELA 4.7: BASES DE ALONGÂMETRO NA PAREDE PRESENTE NOS BLOCOS F 19/20.....	42
TABELA 4.8: MEDIDORES DE JUNTA INTERNO PRESENTE NOS BLOCOS F 19/20.....	42
TABELA 4.9: ROSETAS DE TENSÔMETRO NOS BLOCOS F 19/20.....	42
TABELA 4.10: TERMOMETRO DE MASSA INTERNO NOS BLOCOS F 19/20.....	42
TABELA 4.11: ROSETAS DE TENSÔMETRO NOS BLOCOS F 19/20.....	43
TABELA 4.12: ROSETAS DE TENSÔMETRO NOS BLOCOS F 19/20.....	43
TABELA 4.13: ROSETAS DE TENSÔMETRO NOS BLOCOS F 19/20.....	43
ANEXO 1: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS BASES DE ALONGÂMETRO NA PAREDE.....	85
ANEXO 2: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS BASES DE ALONGÂMETRO NO PISO COM AS BASES DE ALONGAMETRO NA PAREDE.....	86
ANEXO 3: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS TENSÔMETROS.....	86
ANEXO 4: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS MEDIDORES ELÉTRICOS DE JUNTAS.....	87
ANEXO 5: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE ROSETAS DE TENSÔMETRO.....	87
ANEXO 6: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS TERMÔMETROS DE MASSA INTERNO.....	87

ANEXO 7: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS TERMÔMETROS DE SUPERFÍCIE.....	88
ANEXO 8: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS PIEZÔMETROS DE TUBO ABERTO.....	88
ANEXO 9: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE EXTENSÔMETROS	88
ANEXO 10: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PENDULOS DIRETO E INVERTIDO.....	88
ANEXO 11: CORRELAÇÕES ENTRE INSTRUMENTOS DE MESMO TIPO E DIFERENTES, TEMPERATURA E NÍVEL DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO	89

1. INTRODUÇÃO

1.1. Introdução

O monitoramento de barragens feito a partir de um sistema de instrumentação é a principal ferramenta na avaliação de suas condições de segurança, o qual assume diferentes características e finalidades dependendo da etapa da obra que se deseja analisar. Ao longo de sua vida útil, o monitoramento pode detectar variações nas condições de segurança, como resultado de processos de seu envelhecimento e alterações ambientais. O conhecimento do nível de segurança é importante para a definição do conjunto de ações que devem ser tomadas caso ocorra alguma alteração significativa do nível de segurança da barragem (SARÉ, *et al.* 2006).

Ante às limitações dos sentidos humanos e a restrição de acesso a amplas regiões dos maciços e estruturas, têm sido desenvolvidos centenas de tipos e modelos de instrumentos de auscultação que permitem medir, talvez, a totalidade das grandezas físicas de interesse em Engenharia Civil (CRUZ, 2005).

Apesar de a instrumentação não constituir a solução para todos os problemas, é inegável sua utilidade quando convenientemente projetada, instalada e interpretada, não só para a avaliação das condições de segurança de um empreendimento em todas as suas fases, mas também para verificação das hipóteses adotadas em projeto, com o objetivo principal de tornar as obras mais econômicas, dentro das necessárias condições de segurança (CRUZ, 2005).

No ano de 1979, durante o XIII Congresso do ICOLD (Internacional Commission on Large Dams), em Nova Delhi, decidiu-se dar uma maior atenção à segurança de barragens, pois se notava a ocorrência de diversos incidentes com graves conseqüências, além do aumento das dimensões das novas barragens, e do crescimento do número delas sendo construídas em países com pouca ou nenhuma experiência na área. Surgiu então, a necessidade de normas e diretrizes que regulamentassem as barragens existentes e as futuras.

Em 1982 foi criado o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB). No ICOLD, atualmente o Brasil ocupa a presidência do Subcomitê encarregado da elaboração de Diretrizes de Segurança de Barragens, destinadas ao uso em âmbito mundial.

Em 1996 e 1997 o CBGB, através da Comissão de Deterioração e Reabilitação de Barragens, elaborou minuta de portaria nº 739, do Ministério de Minas e Energia, propondo a criação do Conselho Nacional de Segurança de Barragens.

Depois disso, o Ministério criou um grupo de trabalho a fim de elaborar um documento para normalizar procedimentos preventivos e de manutenção com relação à segurança das diversas barragens existentes (MATOS, 2004).

Ao final de 1998 o núcleo de São Paulo do CBGB finalizou o “Guia Básico de Segurança de Barragens”, contendo padrões e procedimentos para a orientação dos proprietários de barragens quanto à segurança das mesmas (MATOS, 2004).

Atualmente não há legislação específica no Brasil para as atividades de segurança de barragens, apenas um projeto de lei a ser aprovado, que consiste no Manual de segurança do Ministério da Integração (Matos, 2004).

Já ocorreram vários casos onde houve a ruptura de uma barragem, causando graves conseqüências sociais e perdas humanas. Além de mortes, a ruptura de barragens causa perdas materiais, como moradias, veículos, móveis, utensílios, alimentos, roupas, etc., e causa grandes conseqüências de ordem psicológicas (SILVA, *et al.*, 2006).

A utilização de instrumentação em barragens permite o acompanhamento das estruturas e as verificações das hipóteses de projeto (CRUZ, 2005, p. 606).

Através da instrumentação das grandezas físicas de interesse e do monitoramento das leituras, é possível comparar o comportamento real de uma obra com o modelo teórico concebido em projeto, processo que se constitui num método eficaz e insubstituível para avaliação da segurança de uma estrutura e para o seu monitoramento ao longo do tempo, com isso, podendo evitar ou prever desastres como os já ocorridos (GUTIÉRREZ, 2003).

Dentro desta crescente preocupação com a segurança de barragens, esta pesquisa pretende colaborar para o desenvolvimento das atividades de monitoramento das barragens, conhecendo como se dá a influência exercida pelas condições ambientais nos instrumentos que compõem o sistema de instrumentação de uma barragem, e como se dá a interação entre os diversos tipos de instrumentos presentes nessa barragem. Facilitando as interpretações feitas pelas equipes de monitoração.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é o de se obter um panorama geral das interações existentes entre as leituras da instrumentação de uma barragem de concreto, bem como entre as leituras dos instrumentos e variáveis ambientais do sítio da barragem, através do cálculo de correlações de séries temporais relacionadas a estas grandezas. Para tal, utilizou-se como caso de estudo a barragem de ITAIPU, a partir das informações obtidas do seu sistema de instrumentação geotécnico-estrutural instalado nos blocos F 19/20.

Como objetivos secundários, podem ser citados: o desenvolvimento de rotinas computacionais capazes de localizar e agrupar dados automaticamente em arquivos texto de grande tamanho, quantificação do intervalo de tempo de ocorrência de picos de leituras na instrumentação decorrentes de eventos hidrometeorológicos e previsão de leituras faltantes de determinado instrumento através da correlação com outros instrumentos.

1.3. Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, assim organizados como descrito a seguir.

No capítulo 1, introduz-se o assunto “monitoração de barragens” e como o mesmo ganhou importância no meio técnico e político. Ainda são apresentados os objetivos desse trabalho e a sua organização.

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica a respeito de segurança e monitoração do comportamento de barragens e os equipamentos fazem parte do sistema de instrumentação.

No capítulo 3 faz-se uma revisão da teoria envolvendo a correlação de Pearson, testes de hipóteses e suas aplicações.

No capítulo 4, apresenta-se a metodologia adotada neste trabalho para os cálculos de correlações entre as séries temporais de leituras de instrumentos de barragens e entre estas leituras e as medidas de variáveis ambientais. Ainda neste capítulo descrevem-se as características da Barragem de ITAIPU e de seu sistema de instrumentação geotécnico-estrutural, que será usado como exemplo de

aplicação da metodologia proposta, explicando-se quais instrumentos foram escolhidos para as análises.

No capítulo 5, apresentam-se os resultados obtidos do cálculo das correlações, bem como sua interpretação.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões desta dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

2. SEGURANÇA E INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

2.1. Segurança de Barragens

A construção de barragens para os mais variados fins acontece há longa data, mas a oficialização de quesitos sobre a segurança deste tipo de obra vem acontecendo desde um intervalo de tempo muito menor, apenas alguns estados dos EUA criaram algum tipo de regulamentação a respeito antes de 1900 (Reed 1987, Walz 1990a).

À medida que a engenharia evoluía, a concepção de barragens se tornou mais ousada, aumentando seu potencial de perigo e a ocorrência de acidentes devidos a falhas de projeto, ocasionado desastres gigantescos (ARMY, 1996), como por exemplo a ruptura abrupta da barragem de Teton Idaho, EUA, ocorrida em 1976, com a perda de 11 vidas e muitos milhões de dólares (Teton Dam Failure, 2005)

Segundo Gutiérrez (2003), o histórico de rupturas de barragens revelou que um longo período de operação normal das obras não é garantia de condições futuras de segurança, uma vez que tem havido casos de ruptura brusca após 10 e 20 anos de operação normal.

Tais problemas fizeram com que profissionais de diversas áreas do conhecimento viessem a discutir o tema segurança de barragens. Desta forma, em 1928, foi criada a ICOLD – *International Commission on Large Dams*, uma instituição não governamental que visa promover um fórum permanente de discussão e troca de conhecimento e experiências entre profissionais do mundo todo a respeito de engenharia de barragens. Atualmente, a ICOLD têm Comitês Nacionais em 83 países, incluindo o Brasil, onde é representado pelo Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB). (AIVEC, 2005). O CBDB foi criado com a finalidade de ser um agente facilitador no processo de assegurar que a realização e a operação de barragens e hidrelétricas seja técnica, ambiental e socialmente adequada ao máximo benefício da sociedade brasileira (CBDB, 2006).

Desde a década de 1960, os temas de maior ênfase que a ICOLD tem abordado são relacionados à segurança de barragens, o seu monitoramento, re-análise da estabilidade de obras antigas, estudo de efeitos de envelhecimento e impactos ambientais gerados por barragens (AIVEC, 2005).

A cada três anos, o ICOLD promove o Congresso Internacional de Grandes Barragens, cuja primeira edição foi em 1933, na cidade de Estocolmo, na Suécia. Em cada congresso, o ICOLD lança algumas questões que podem ser respondidas pelos diversos profissionais em engenharia de barragens, através da publicação e apresentação de trabalhos técnicos. Nas últimas edições deste congresso houve questões relacionadas ao tema “Segurança de Barragens”, sendo que na vigésima e penúltima edição, ocorrida na cidade de Pequim, em 2000, três das quatro questões formuladas estavam intimamente ligadas ao tema de segurança e análise de risco em barragens (AIVEC, 2005).

Segurança de barragens se define pela capacidade para satisfazer exigências de comportamento, visando evitar a ocorrência de acidentes e/ou incidentes (RSB, 1990).

Segundo Cardia (2004), de acordo com Comissão Internacional das Grandes Barragens, acidente é qualquer situação que possa afetar a segurança e incidente é qualquer situação que possa afetar a funcionalidade da barragem. Também segundo o mesmo autor, ruptura de barragem é qualquer ocorrência na estrutura da barragem, fundação, órgão de segurança ou reservatório, que provoque (para jusante), liberação não controlada de elevado volume de água.

De acordo com Saré, *et al.* (2006), o conceito de segurança deve ser entendido em um sentido global, envolvendo aspectos de natureza geotécnica, estrutural, hidráulica, operacional e ambiental.

Atualmente existem diversas diretrizes adotadas por diferentes países no que diz respeito à segurança de barragens. Um apanhado geral sobre as mesmas, incluindo comparações entre as diferentes metodologias empregadas na priorização de riscos e tomada de decisões relacionadas a barragens, visando sua segurança, podem ser encontradas em HARRALD *et al.*, 2004.

Dentre as metodologias existentes, duas delas se destacam: as diretrizes do ANCOLD (Australian Committee on Large Dams) (ANCOLD, 2003), e do B.C.Hydro (B.C.Hydro, 1993).

As diretrizes do ANCOLD se baseiam no princípio ALARP, “*reducing risks as low as reasonably practicable*”, que se fundamenta na obrigação legal que os proprietários de barragens têm de reduzir os riscos a valores bastante baixos, considerados aceitáveis (AIVEC, 2005).

Algumas vezes, porém, estes tipos de critérios exagerados acabam por gerar gastos de manutenção e reforma em barragens desproporcionais aos benefícios gerados pela redução, às vezes insignificante, do risco de ruptura (BOWLES, 2003).

No Brasil, não há legislação vigente no âmbito da segurança de barragens. Diretrizes foram publicadas em 1983 pelo CBGB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, fundado em 1961 (CBGB, 1983).

Atualmente, encontra-se em tramitação pelo Congresso Nacional o Projeto de Lei nº 1.181/2003, que estabelece diretrizes para verificação da segurança de barragens de cursos de água para quaisquer fins e para aterros de contenção de resíduos líquidos industriais (MONTEIRO, 2003); e o projeto de lei Nº 4.038/2004, que torna obrigatória a contratação de seguro contra o rompimento de barragens (PONTES, 2004).

Em 1999, no XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, realizado em Belo Horizonte/MG, foi apresentado o Guia Básico de Segurança de Barragens. Segundo este guia, o proprietário é o responsável pela segurança da barragem em todas as fases, isto é, construção, comissionamento, operação e abandono, respondendo pelas conseqüências de uma eventual ruptura (SILVEIRA, 2004).

De acordo com Silveira (2004), alguns dos principais pontos sobre a avaliação da segurança de barragens, retirados deste guia são:

- Todas as barragens devem ser classificadas quanto às conseqüências de uma ruptura em potencial, onde devem ser considerados fatores como população a jusante, danos materiais, danos ao meio ambiente, danos à infra-estrutura, etc.;
- Devem ser inspecionadas periodicamente, para detectar eventuais deteriorações;
- Devem ser instrumentadas de acordo com seu porte e riscos associados, e terem seus dados analisados, através das leituras;
- Todos os instrumentos devem ser dotados de valores de controle ou limites;
- Todas as barragens devem ser submetidas periodicamente a uma reavaliação de suas condições de segurança, segundo sua classificação quanto às conseqüências de ruptura;
- As barragens deverão ser dotadas de um plano de emergência, objetivando a preservação das pessoas residentes a jusante, em caso de acidente.

Segundo Cardia (2004), os principais tipos de acidentes que ocorrem em barragens são o galgamento, a erosão interna e os sismos. O galgamento (*overtopping*) é a situação onde o nível de água do reservatório sobe muito por algum motivo, normalmente por vazão afluyente elevada, e provoca a passagem da água por cima do topo da estrutura da barragem, de montante para jusante. A erosão interna (*internal erosion*) é a formação de vazios no interior de solo ou rocha mole, causada por efeito mecânico ou químico, de remoção de material, por percolação. Também é conhecida como *piping*, que é o desenvolvimento progressivo da erosão tubular interna por percolação, surgindo à jusante na forma de cavidade, descarregando água turva por carregamento.

Para Ramos e Melo (2006), as partes de uma barragem que merecem atenção com relação à segurança são principalmente as estruturas de desvio, os vertedouros e a descarga de fundo.

De acordo com Cruz (2005), os principais meios de que o engenheiro dispõe para avaliar a segurança de um empreendimento ao longo de sua vida útil são: inspeções visuais (inclusive subaquáticas, quando for o caso), auscultação geodésica de deslocamentos verticais e/ou horizontais, levantamentos batimétricos, e instrumentação de auscultação.

2.2. Ocorrências de Acidentes e Incidentes em Barragens

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), em um levantamento sobre 9.248 barragens com altura superior a 5m construídas até 1965, forneceu questionário a ser respondido pelos Comitês Nacionais (ELETRONORTE, 2006). Nos questionários, foram definidos dois tipos de ruptura e três tipos de acidentes:

- Ruptura tipo 1 (F1): Importante, com abandono da obra.
- Ruptura tipo 2 (F2): Severa, mas possibilitando reparos.
- Acidente tipo 1 (A1): Acidente em operação, com reparos imediatos (abaixamento do reservatório, etc).
- Acidente tipo 2 (A2): Acidente durante o primeiro enchimento do reservatório, evitando-se a ruptura de modo análogo ao anterior.

- Acidente tipo 3 (A3): Durante a construção, corrigido de modo a possibilitar o enchimento do reservatório sem problemas.

Do total de casos analisados, registraram-se 534 acidentes, envolvendo 426 barragens, pois algumas tiveram mais de um acidente. A TABELA 2. 1 mostra o número de casos registrados para cada tipo de acidente (ELETRONORTE, 2006).

TABELA 2. 1: NÚMERO DE ACIDENTES OCORRIDOS EM BARRAGENS

Tipo de Acidente	Casos Registrados
F1	84
F2	118
A1+A2+A3	322

FONTE: ELETRONORTE, 2006

Os acidentes foram divididos em quatro grupos:

Grupo A: acidentes entre 1900 e 1965 em barragens com altura superior a 15m.

Grupo B: acidentes entre 1900 e 1965 em barragens com altura entre 5 e 15m.

Grupo C: acidentes anteriores a 1900.

Grupo D: acidentes ocorridos durante o período construtivo.

A TABELA 2.2 mostra quantos acidentes, divididos nos grupos A a D, foram registrados entre 1900 e 1965. A TABELA 2.3 apresenta o número de acidentes ocorridos em diferentes tipos de barragens neste mesmo período.

TABELA 2.2: NÚMERO DE ACIDENTES OCORRIDOS EM BARRAGENS NO DECORRER DO TEMPO

Grupo	Casos Registrados
A	290
B	98
C	78
D	68
TOTAL	534

FONTE: ELETRONORTE, 2006

TABELA 2.3: NÚMERO DE ACIDENTES OCORRIDOS EM DIFERENTES TIPOS DE BARRAGENS

TIPO DE BARRAGENS	EVENTO		TOTAL	% TOTAL
	Ruptura	Acidente		
Concreto arco	7	14	21	5
Concreto Contraforte	7	9	16	3
Concreto Gravidade	40	26	66	14
Terra	122	200	322	69
Enrocamento	13	14	27	6
Diversas	13	1	14	3
Total			466	100

FONTES: ELETRONORTE, 2006

Dentre alguns acidentes e incidentes com barragens que ocorreram, pode ser citado o de março de 1928, em Los Angeles, quando houve o escorregamento da fundação da barragem Saint Francis, que levou à morte cerca de 450 pessoas. Ainda em Los Angeles, em dezembro de 1963, houve a ocorrência com a barragem de Baldwin Hills, que sob a ação de erosão na fundação, ocasionou cinco mortes. Outro acidente ocorreu em dezembro de 1959, na França, na barragem de Malpasset. O número de vítimas foi de 421 pessoas. Nos EUA, a barragem de Teton também sofreu erosão na fundação, em junho de 1976. Em torno de 11 a 14 pessoas morreram. Na barragem de Chicoutimi, no Canadá, em julho de 1996, houve a ocorrência de galgamento. Não se sabe o número de vítimas (CARDIA, 2004).

No Brasil, as grandes barragens já deslocaram mais de um milhão de pessoas e inundaram 34 mil km² de terras agricultáveis e florestas. Em março de 1960, houve o acidente com a barragem de Orós, no Ceará, com 50 mortes, devido ao galgamento. Em 1954, Minas Gerais, a barragem de Pampulha sofreu erosão na fundação. Não se sabe o número de mortes. Somente no mês de janeiro de 1977, em São Paulo, houve ocorrências nas barragens de Rio Pardo, Euclides da Cunha e Limoeiro. Ainda em São Paulo, em janeiro de 1980, houve ocorrência de incidentes com a barragem de Água Vermelha. A barragem de Santa Helena, Bahia, em maio de 1985, sofreu erosão na fundação, e, não se sabe o número de mortos. Em junho

de 2004, na Paraíba, a barragem de Câmara causou acidente pela deficiência de materiais, foram cinco mortes (CRUZ, 2005).

2.3. Instrumentação de Barragens

Um sistema de monitoração, baseado em dados de instrumentação confiáveis, auxilia na prevenção de acidentes e incidentes (CRUZ, 2005).

Os dispositivos de instrumentação são usados de forma complementar às inspeções visuais para avaliar o desempenho e a segurança das barragens. A monitoração cuidadosa dos dados da instrumentação em uma base continuada pode revelar uma condição crítica possível ou dar meios para assegurar que uma condição observada não é séria e não requer medidas corretivas imediatas (DEPARTMENT OF THE ARMY U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1996).

“A instrumentação deve ser monitorada, analisada e mantida, para garantir a operação segura da barragem”. (COMISSÃO REGIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS, 1999).

O sistema de instrumentação é feito através de um plano que se baseia em um projeto obtido primeiramente através dos resultados do estudo detalhado das características geológico-geotécnicas da região e do entorno onde estará locada a barragem, através do qual são definidas seções e blocos "chaves" a serem observados e instrumentados (GUTIÉRREZ, 1996).

A instrumentação monitora o desempenho estrutural e funcional e é instalada nas barragens onde as condições complexas ou incomuns do local foram encontradas ou onde há uma probabilidade elevada de que a falha poderia resultar na perda de vida ou danos de propriedades extensivas (FEDERAL GUIDELINES FOR DAM SAFETY, 2004).

As principais razões para o uso de instrumentação numa barragem, segundo CELERI (1995), são:

- Verificação do projeto, onde o principal objetivo é o de certificar-se de que além do mesmo ser seguro é também o mais econômico;
- Verificação da conveniência de novas técnicas de construção;
- Diagnosticar a natureza específica de algum evento adverso para uma prevenção de ocorrência futura;
- Verificação contínua de uma performance satisfatória;

- Razões preditivas;
- Razões legais;
- Pesquisas para o estado da arte.

As fases da obra de uma barragem que devem ser instrumentadas são as seguintes:

- a) Período construtivo: o monitoramento das barragens ainda no período de construção supre a equipe de execução com importantes informações sobre os materiais, suas fundações e métodos construtivos, tornando possível a verificação do projeto em andamento. Com isso, os critérios e diretrizes preestabelecidos em projeto podem ser aferidos quanto às análises de tensões e controle de fissuração de origem térmica, mudanças no plano de concretagem e nos intervalos de lançamentos do concreto, contribuindo para prevenir a rápida deterioração das estruturas.
- b) Fase de enchimento do reservatório: período em que a barragem passa a entrar em carga total pela primeira vez, sendo considerado este o período mais crítico na sua vida útil. A monitoração assume um papel importante, pois permite um diagnóstico preciso da obra, comparando os dados com os limites de projeto. Há o controle de parâmetros como deslocamentos horizontais e verticais, movimento de algumas juntas, temperatura e deformação do concreto, para prevenir ruptura ou fissuramento excessivo durante esse primeiro enchimento e sempre que possível deve ser de forma lenta para a adaptação da estrutura com as novas condições criadas. (ANDRIOLO, 1993)
- c) Período operacional: a instrumentação, aliada às inspeções visuais, fornece parâmetros para que se avalie o desempenho das estruturas ao longo do período de operação do reservatório (LUZ, 1993).

Os principais fatores que influenciam as grandezas monitoradas, segundo LUZ, 1993 são:

- Carga direta: forças exercidas pelos contatos com a barragem de terra ou enrocamento e pelos níveis d'água a montante e jusante;
- Subpressões na fundação: devido à percolação ou infiltração de água pela rocha de fundação, durante e após o enchimento do reservatório;

- Pressão intersticial do concreto: pressão exercida pela água que infiltra pelos interstícios do concreto, juntas de construção e falhas de construção durante a concretagem;
- Calor de hidratação do cimento: calor gerado pela hidratação do cimento, ficando armazenado no interior de um bloco, provocando tensão de compressão no concreto, e o posterior resfriamento da estrutura, provocando tensões de tração;
- Sismos, que podem ser:
 - naturais, causados pelo deslocamento de placas tectônicas e atividades vulcânicas;
 - induzidos, causados pela criação de um reservatório, que altera as condições estáticas das formações geológicas, do ponto de vista mecânico (peso da massa d'água) e do ponto de vista hidráulico (a infiltração de fluidos pode causar pressões internas nas camadas rochosas profundas). É um fenômeno dinâmico, resultante das novas forças induzidas, e que passam a interferir sobre o regime das forças pré-existentes.

De acordo com Duarte (2006), entre as medidas necessárias para garantir um nível de segurança adequado para a obra, a instalação de um sistema de instrumentação geotécnica é uma das mais importantes, pois constituirá o meio de acompanhar durante a vida útil da obra se o nível de segurança se mantém dentro das premissas estabelecidas em projeto, permitindo, caso sejam detectadas anomalias, intervenções tempestivas para a manutenção da integridade e segurança da obra.

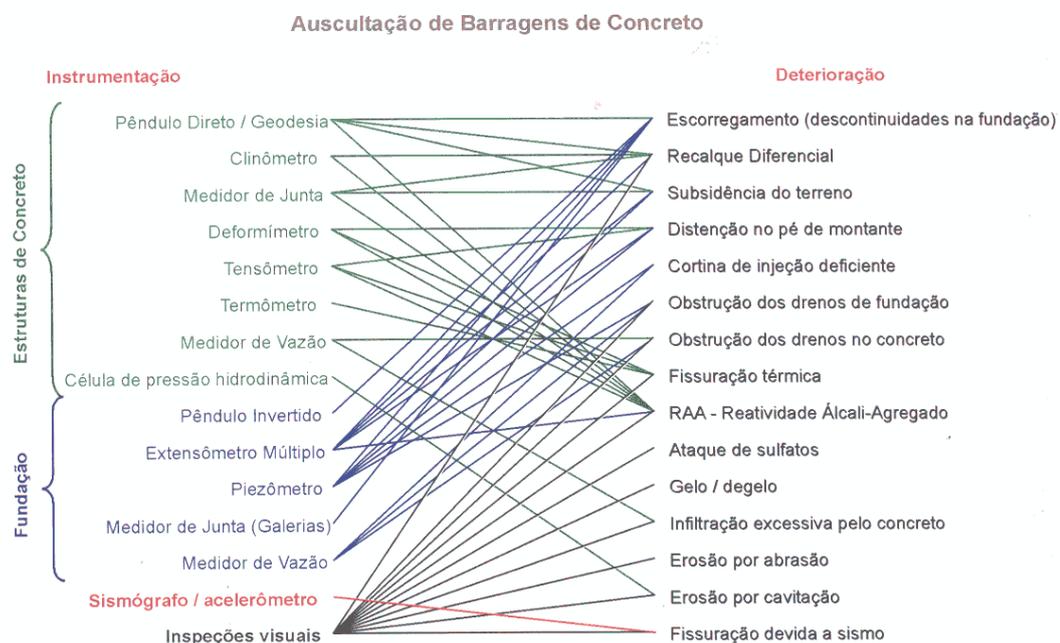
2.4. Instrumentos de Auscultação de Barragens

Segundo Cruz (2005), o instrumento ideal deveria ter as seguintes características:

- confiabilidade;
- alta durabilidade;
- não provocar, durante ou após a instalação, alterações no valor da grandeza que pretende medir;
- robustez;
- alta precisão;

- alta sensibilidade;
- não ser influenciável por outras grandezas, que não a de interesse;
- instalação simples;
- não causar interferência na leitura de outros instrumentos.

Na FIGURA 2.1, apresenta-se uma relação entre os tipos de instrumentos usualmente empregados na auscultação de barragens de concreto, conjuntamente as inspeções visuais, e os principais tipos de deterioração que podem ser detectados pelos mesmos. Nesta figura destaca-se a importância da instrumentação da fundação e de inspeções visuais (SILVEIRA, 2003).



FONTE: (SILVEIRA, 2003)

FIGURA 2.1: RELAÇÕES ENTRE OS DIVERSOS INSTRUMENTOS E A DETERIORAÇÃO OBSERVADA NA BARRAGEM

A FIGURA 2.1 demonstra que as inspeções visuais podem detectar grande parte das deficiências encontradas em barragens, tais como fissurações devidas a sismos e erosões, em fundações e barragens de aterro, e recalques diferenciais e fissurações térmicas, em barragens de concreto. Porém estas informações serão apenas qualitativas e não quantitativas.

A instrumentação será diferente para cada tipo de estrutura a ser instrumentada; as grandezas de maior importância a serem medidas variarão de acordo com o tipo de estrutura (DUARTE, 2006).

As principais grandezas a serem medidas em barragens de terra e fundações, conforme Cruz (2005) é: nível de água, medido por medidores de nível de água; subpressão, medida por piezômetros; tensões efetivas, detectadas por

célula de tensão total; deslocamentos, medidos por medidores de recalques, inclinômetros, extensômetros de hastes e fios; vazão, medida por medidores de vazão; deslocamento cisalhante, detectado por pêndulos invertidos.

As principais grandezas a serem medidas em barragens de concreto, segundo Silveira (2003), são: recalques, medidos por extensômetros e marcos superficiais; deslocamentos horizontais da crista, detectados por pêndulos diretos, marcos superficiais, inclinômetros, fitas de cisalhamento; distensão a montante, medida por extensômetros múltiplos; deslocamentos diferenciais entre blocos, detectados por bases de alongômetros, medidores triortogonais; temperatura, medida por termômetros internos e de superfície.

A seguir, mostra-se a descrição de alguns instrumentos utilizados na monitoração de barragens, dando ênfase aos que foram analisados nesse trabalho.

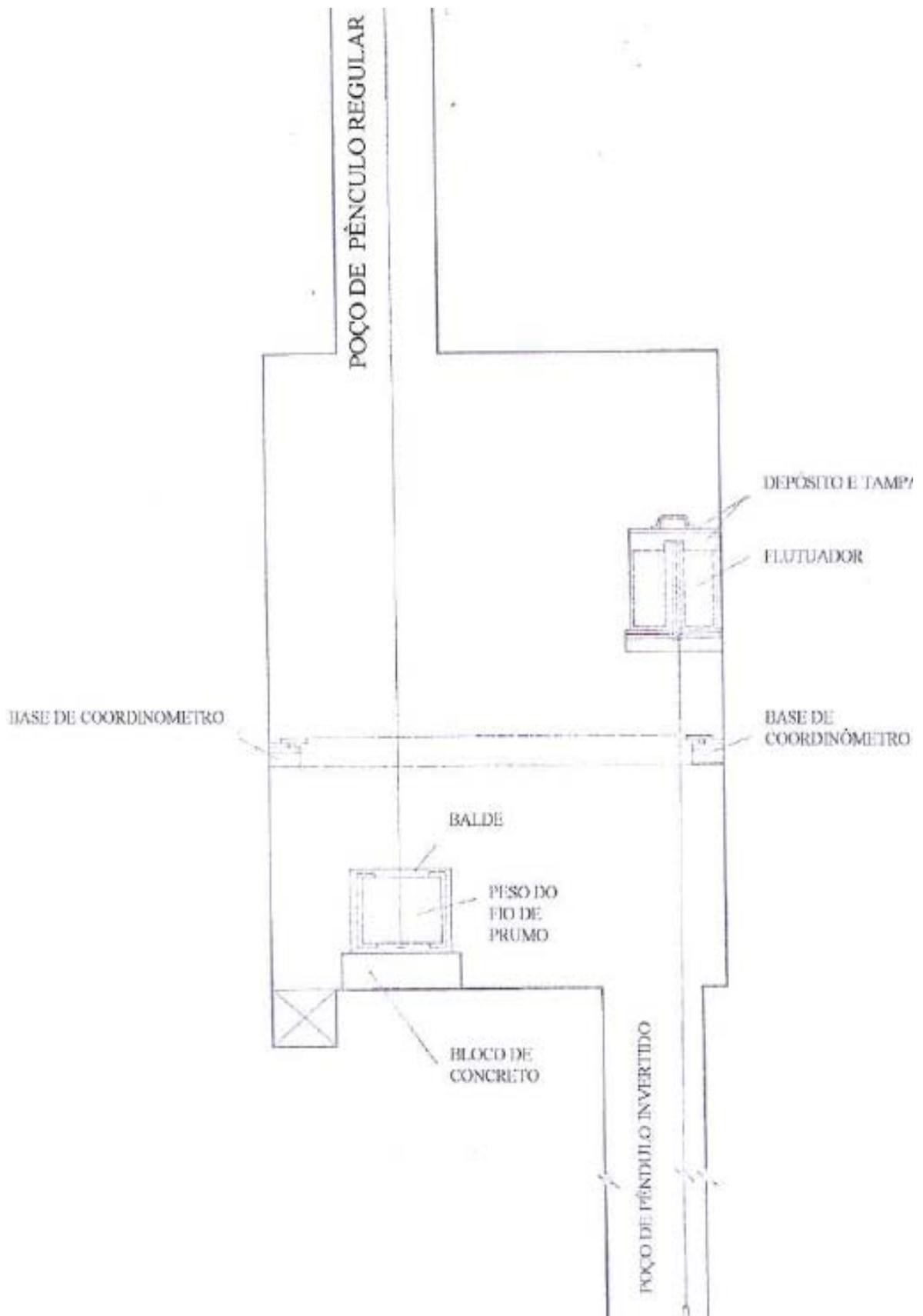
2.4.1 Instrumentos usualmente instalados em estruturas de concreto de barragens:

a) Pêndulos:

Nas barragens tipo gravidade, os deslocamentos horizontais são usualmente observados por pêndulos diretos, fixos à crista da barragem indo até o contato concreto-rocha, e por pêndulos invertidos, fixos na fundação, indo até a crista. Os poços verticais, onde são instalados os pêndulos no final do período construtivo da barragem, são executados durante a concretagem das estruturas, sendo de extrema importância sua verticalidade, para que não interfira no campo de leitura do instrumento. (G.H. LEI, Y.B. AI, e J.Y. SHI, 2000).

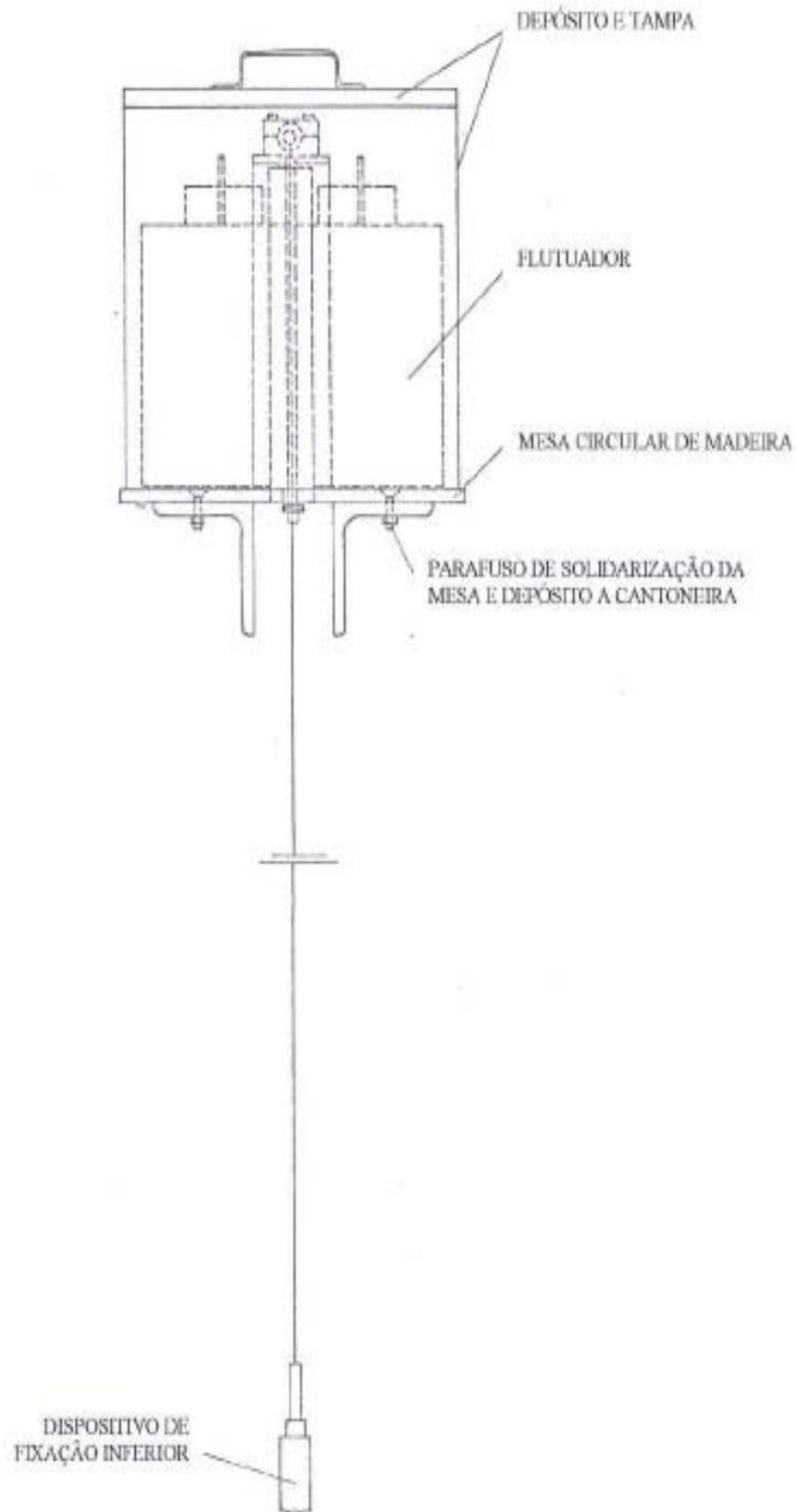
As instalações dos pêndulos, direto e invertido, devem ser nos mesmos blocos, possibilitando a determinação dos deslocamentos horizontais (deslocamentos relativos) da crista da barragem em relação ao ponto considerado fixo na fundação. Na FIGURA 2.2, observa-se a associação de dois tipos de pêndulos, direto e invertido, para a medida do deslocamento da crista da barragem até a fundação da mesma. A FIGURA 2.3 mostra o esquema de instalação de um pêndulo invertido.

As leituras dos deslocamentos horizontais são realizadas com o auxílio de coordenômetros óticos (FIGURA 2.4) ou telecordinômetros, segundo as direções montante-jusante e margem direita-esquerda.

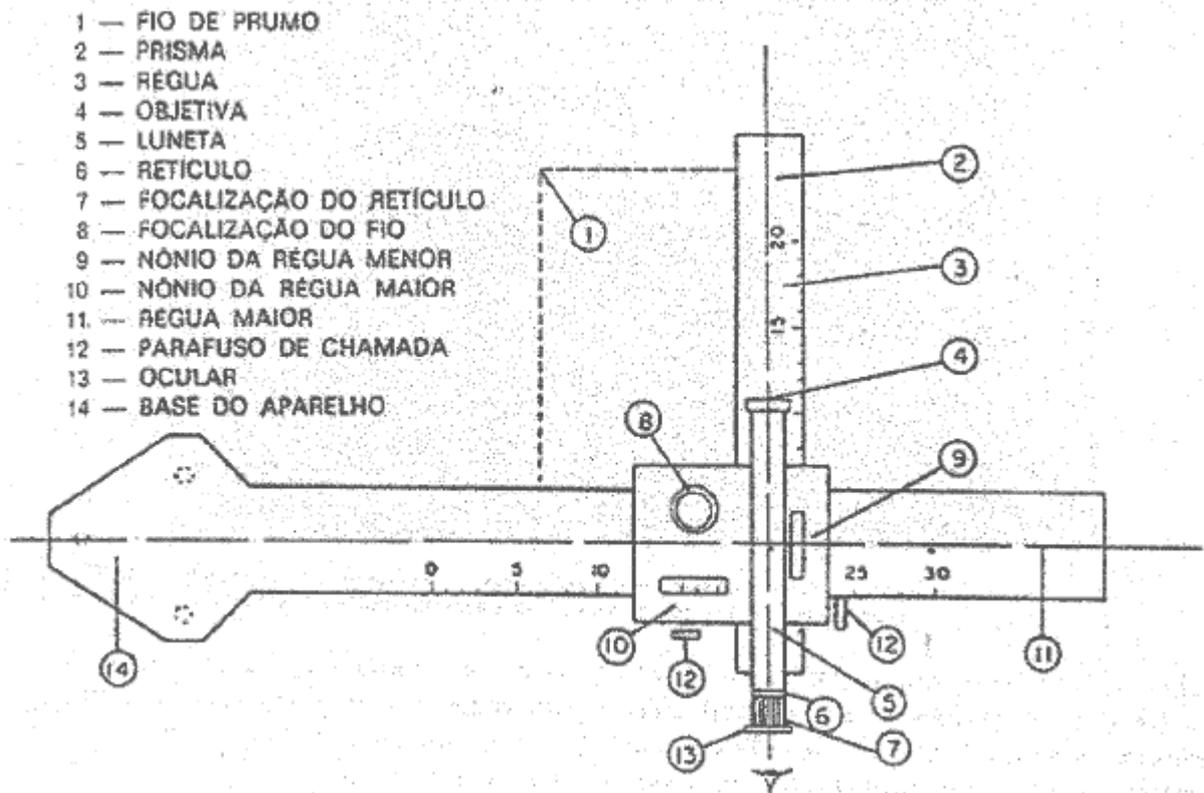


FONTE: (MATOS, 2002)

FIGURA 2.2: ESQUEMA DE INSTALAÇÃO, PÊNULO DIRETO E INVERTIDO.



FONTE: (MATOS, 2002)
FIGURA 2.3: PÊNDULO INVERTIDO.



FONTE: (MATOS, 2002)

FIGURA 2.4: COORDINÔMETRO ÓTICO E SEUS COMPONENTES

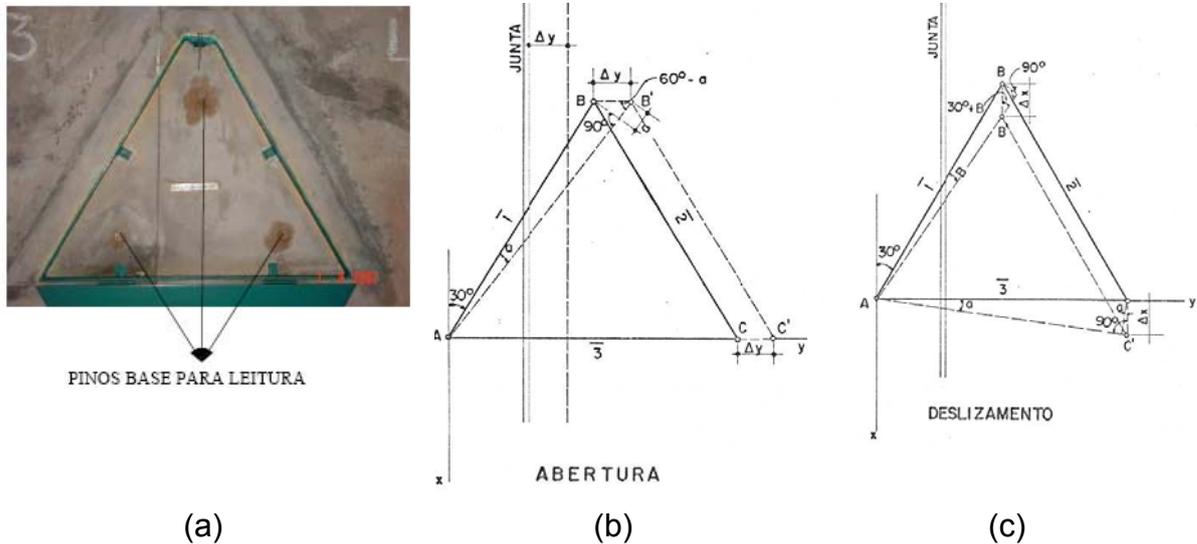
O coordenômetro fornece leitura em duas direções ortogonais, sendo uma paralela ao eixo da barragem e outra normal ao eixo. É formado por duas réguas graduadas, normais entre si, sendo uma de 30 cm e outra de 15 cm. A régua menor tem uma ocular provida de retículo, com seus eixos coincidentes, tendo na extremidade um prisma que está a 45° do eixo da régua. A régua menor se move sobre a maior, que é fixa, permitindo então leituras sem mover o coordenômetro. Com o fim de ter uma referência fixa ligada ao concreto, é fixado um cone de aço inoxidável que será visado antes do fio, evitando assim qualquer erro no apoio do aparelho (SILVEIRA, 2003, p. 228).

b) Bases de alongâmetro

Os deslocamentos horizontais e verticais entre blocos da barragem de concreto são determinados através das bases de alongâmetro (ou marcos para medidor de junta) (DUNNICLIFF, 1988, p. 79).

O alongâmetro (FIGURA 2.5) é composta de uma base triangular de referência, previamente posicionada na junta. A leitura é feita por um dispositivo portátil acoplado a um relógio comparador. Para a medida das deformações, o medidor é encaixado nos pinos bases para leitura (FIGURA 2.5a), observando a

variação das distâncias entre os pinos na base horizontal, podem-se obter a abertura entre as juntas dos dois blocos de concreto (FIGURA 2.5b), utilizando o pino esquerdo inferior com o pino superior como bases de leitura, verificam-se o deslizamento entre os dois blocos (FIGURA 2.5b) (RIC, 2005).

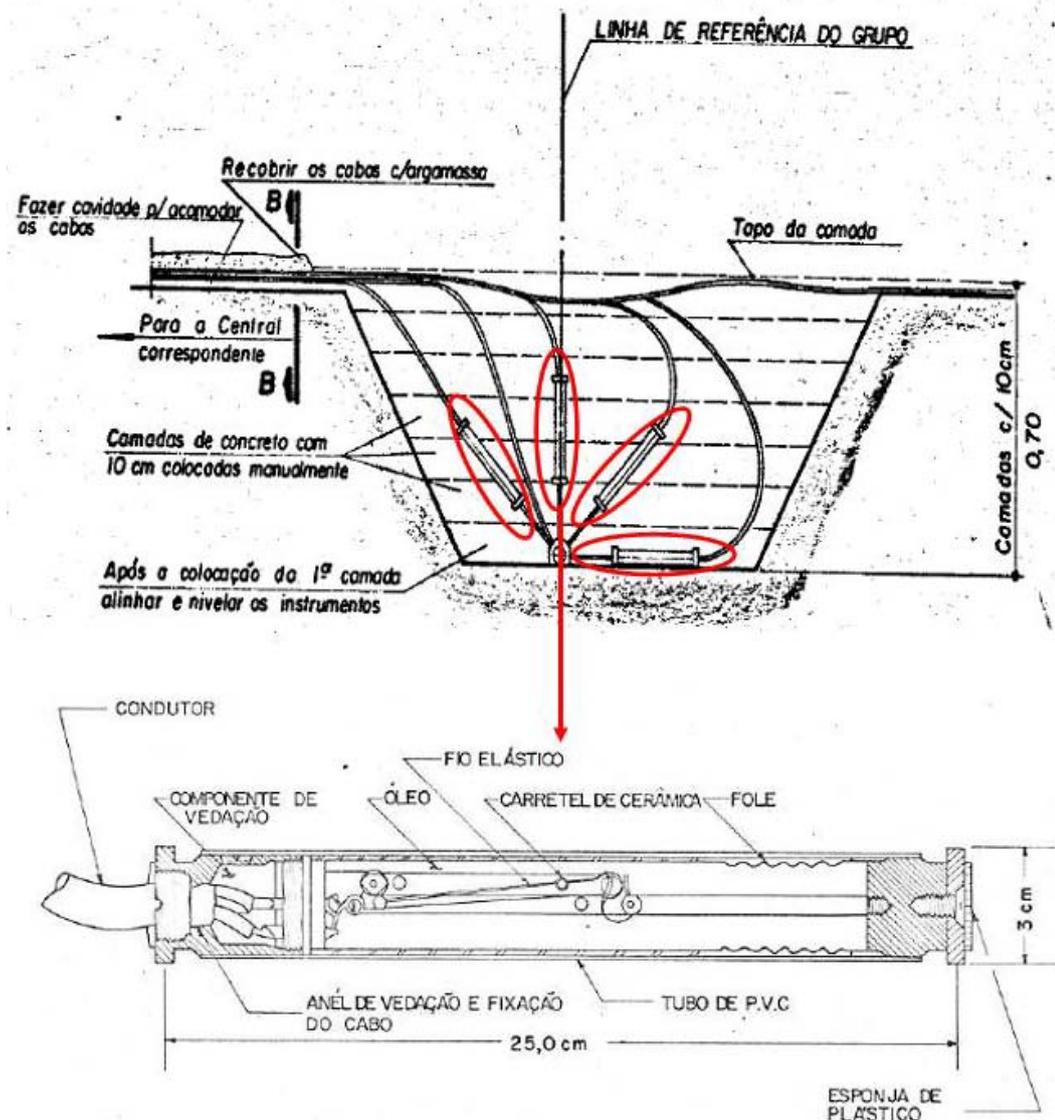


FONTE: (MATOS, 2002)

FIGURA 2.5: BASE DE ALONGÂMETRO

c) Rosetas de deformímetro

A obtenção das tensões pode ser feita através da instalação de roseta de deformímetro (FIGURA 2.6), que consiste em um instrumento instalado no interior do concreto de uma estrutura, e que mede a deformação na direção de seus eixos. A roseta, ainda fornece a temperatura do concreto.



FORNTE: (ITAIPU, 2006)

FIGURA 2.6: PERFIL DE INSTALAÇÃO DAS ROSETAS DE DEFORMÍMETRO NA ESTRUTURA DE CONCRETO E A VISTA ESQUEMÁTICA DE UM MEDIDOR DE DEFORMAÇÃO TIPO CARLSON

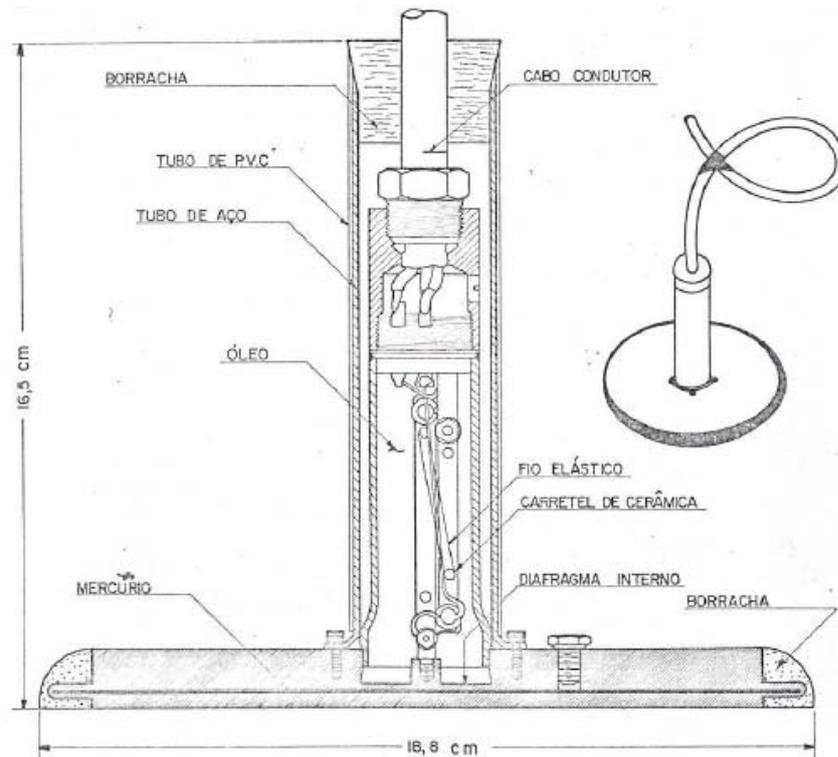
O desempenho dos deformímetros é muito afetado pela avaliação do comportamento inicial do concreto de cobrimento. Durante o período construtivo, valores de tensão são significativamente superiores ao previsto, mas após dois ou três meses de instalação, os mesmos passam a indicar leituras compatíveis aos tensômetros. (ROSSO, 1996).

d) Tensômetros para concreto

Os tensômetros (FIGURA 2.7) medem apenas tensões de compressão, através da medida direta das tensões, enquanto que as rosetas medem deformações obtidas dos esforços de compressão e tração, convertendo estas medidas em tensões. Nota-se uma grande superioridade técnico-econômica dos

tensômetros em relação aos deformímetros, pois os valores das tensões de compressão são obtidos mais rapidamente com custos menores e com satisfatória performance. (VASCONCELOS, 1980)

Apesar dos tensômetros serem aparelhos de maior confiabilidade que os deformímetros para a medição de tensão em estruturas de concreto, eles têm a limitação de não medir tensão de tração, como os deformímetros. (ROSSO,1996)



FUNTE: (MATOS, 2002)

FIGURA 2.7: VISTA ESQUEMÁTICA DE UM TENSÔMETRO PARA CONCRETO

f) Termômetro

A instalação de uma rede de termômetros embutidos no concreto, que são sensores de temperatura, tais como o mostrado na FIGURA 2.8 servem para observar a evolução da temperatura devido ao calor de hidratação do cimento. Os termômetros instalados junto à face de montante medem a temperatura da água do reservatório. As temperaturas medidas pelos deformímetros também contribuem para a observação da evolução da temperatura (PEDRO, 1979).

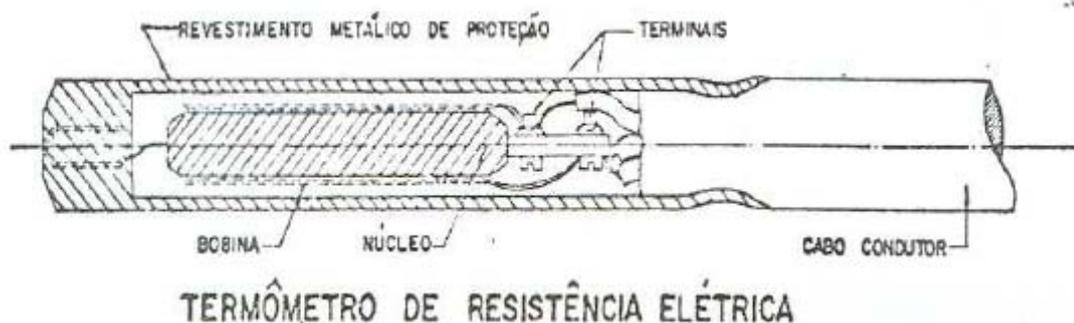


FIGURA 2.8 ESQUEMA DOS TERMÔMETROS TIPO CARLSON.

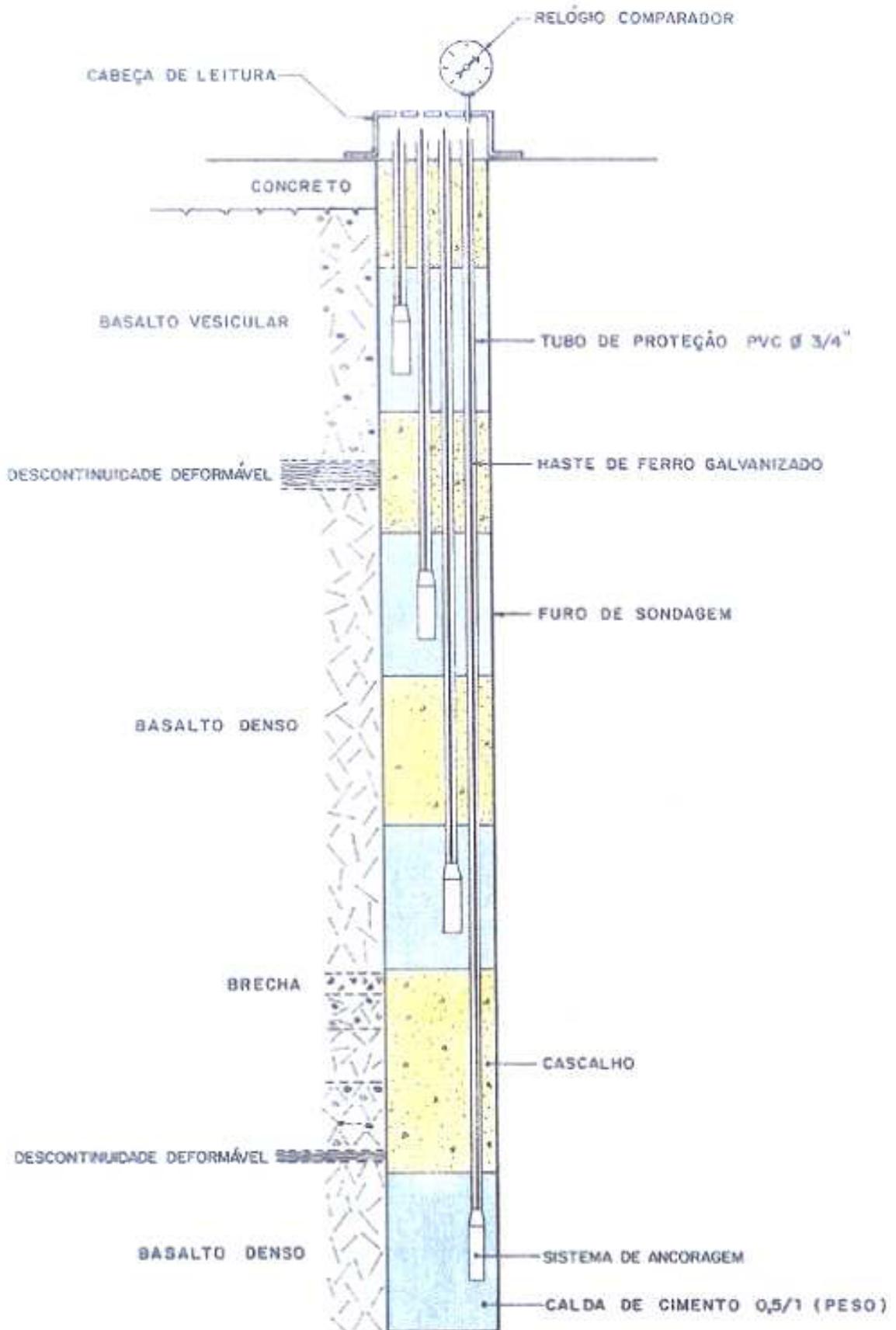
As medidas de infiltração e deformação são de vital importância para o satisfatório monitoramento da segurança das barragens. A medição das vazões de infiltração através do concreto envolve geralmente as seguintes fontes: dos drenos internos do concreto, dos drenos de junta entre blocos e das fissuras no concreto. (IIDA, 1979)

Mesmo numa barragem com instrumentação adequada para o seu monitoramento, a inspeção visual é uma ferramenta muito importante para garantir a segurança da mesma. As inspeções podem ser de rotina (informais), periódicas (formais) e especiais (excepcionais). Inspeção visual de rotina tem um papel relevante no controle de segurança de uma barragem. Estas inspeções são feitas pela mesma equipe que faz a leitura nos instrumentos. Ela é feita durante as campanhas de leituras, pois esta equipe já está sensibilizada com o comportamento da barragem, podendo fornecer informações relevantes de imediato. (LNEC, 1997)

2.4.2 Instrumentos usualmente instalados em fundações de barragens:

a) Extensômetros

Os deslocamentos angulares são medidos junto à base das barragens de concreto através da instalação de dois extensômetros verticais profundos na fundação (FIGURA 2.), um a montante e o outro a jusante. Além do deslocamento angular, eles fornecem também a deformabilidade do maciço rochoso de fundação.



FONTE: (ITAIPU, 2006)

FIGURA 2.9: PERFIL DE INSTALAÇÃO DE UM EXTENSÔMETRO

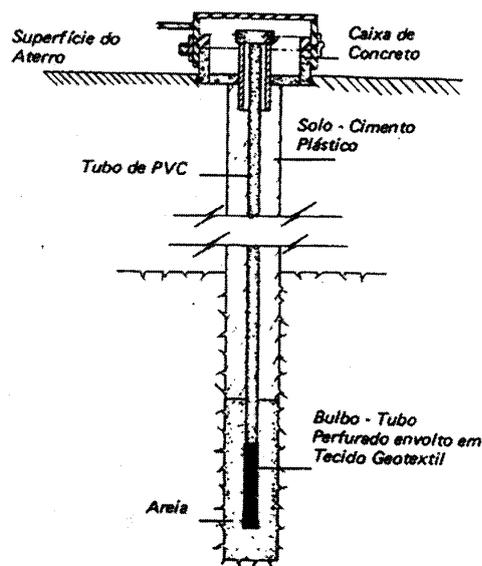
b) Piezômetros

A instalação de piezômetros objetiva determinar pressões neutras em maciços de terra ou rocha, ou subpressões em contatos com estruturas de concreto. Podem ser de tubo aberto, pneumático, hidráulico, elétrico de resistência e de corda vibrante (CRUZ, 2005).

Os piezômetros de tubo aberto são utilizados com grande frequência na auscultação de maciços rochosos e barragens de terra (CRUZ, 2005). Em Itaipu são conhecidos como Piezômetros *Standpipe*. Este tipo de instrumento consiste em um tubo de PVC cuja extremidade inferior é perfurada e envolta por manta geotêxtil (BIDIM), através da qual a água penetra, formando uma coluna equivalente à pressão externa atuante. A leitura é feita introduzindo no tubo uma trena com sensor elétrico (chamado pio) na extremidade, que acusa o encontro com a água através da variação brusca de leitura de um dispositivo analógico. Após a detecção da presença de água, é realizada a leitura da trena. Alguns desses instrumentos possuem coleta automatizada de dados (PORTO, 2006).

Outro tipo de piezômetro encontrado em Itaipu é o conhecido por Piezômetro Geonor. O Piezômetro Geonor é um piezômetro do tipo elétrico, que possui a extremidade porosa para a penetração da água (PORTO, 2006).

Um corte esquemático de piezômetro de tubo aberto pode ser visualizado na FIGURA 2..



FONTE: CRUZ, 2005
FIGURA 2.10: PIEZÔMETRO DE TUBO ABERTO

2.5. Frequência de Leitura dos Instrumentos de Auscultação

As frequências de leitura da instrumentação devem ser adequadas aos desempenhos previstos no projeto para as fases de construção da barragem, primeiro enchimento do reservatório e operação e para possibilitar o acompanhamento das velocidades de variação das grandezas medidas, levando-se em consideração a precisão dos instrumentos e a importância dessas grandezas na avaliação do desempenho real da estrutura.

As frequências recomendadas em projeto devem ser realizadas como frequências mínimas de leitura, devendo ser intensificadas ou ajustadas, quando da ocorrência de fatores tais como (CBGB. 2004):

- Mudanças nas condições geotécnicas ou geológicas antecipadas para o local;
- Alterações nos procedimentos construtivos;
- Mudanças significativas no projeto;
- Subida ou rebaixamento muito rápido do nível do reservatório;
- Fenômenos naturais inesperados ou particularmente severos;
- Tendências desfavoráveis à segurança da estrutura.

Deve-se assegurar que os leituristas atuem como inspetores visuais, percorrendo os diversos trechos e galerias da barragem, no mínimo uma vez por semana. Esta recomendação é especialmente válida para o período operacional (CARDIA, 2004)

Após a fase de instalação é recomendável que cada instrumento seja lido preferencialmente na mesma hora do dia: os instrumentos devem ser divididos em grupos de observação em um mesmo dia e suas leituras devem ser programadas com seqüência e itinerário fixos.

Outra recomendação é que os observadores que efetuem as leituras de um determinado tipo de instrumento sejam sempre os mesmos, evitando-se trocas freqüentes nas equipes de leitura, o que acaba tendo reflexo na precisão dos dados adquiridos. Em caso de substituições programadas dos observadores é recomendável que o seu substituto o acompanhe por no mínimo duas campanhas de leituras. (CBGB. 2004)

Instrumentos cujos dados são analisados de forma integrada, tais como resultados obtidos através dos pêndulos e da campanha geodésica, devem ter

freqüências iguais e leituras realizadas preferencialmente nos mesmos dias e horários.

Se após quatro ou cinco anos de operação, a barragem e suas fundações apresentaram características estáveis, o intervalo entre leituras pode ser alongado para um mês no máximo. Por outro lado, se houver qualquer indicação de tendências que poderiam conduzir a condições perigosas, as freqüências de medidas relevantes, observações e inspeções devem ser intensificadas. (SILVEIRA, 2004)

A ICOLD (International Commission on Large Dams) padronizou as freqüências usualmente utilizadas. A TABELA 2. 4 se refere à tabela de padronização de leituras da ICOLD, de instrumentos de fundação e aterro (CRUZ, 2005).

TABELA 2. 4: FREQUÊNCIAS MÍNIMAS DE LEITURA EM BARRAGENS DE CONCRETO, SEGUNDO ICOLD (MATOS, 2002)

Grandeza medida	Período de observação			
	Construtivo	Primeiro enchimento	Início de operação	Operação normal
Deslocamento "absoluto" (geodesia)	Ao final da construção	Mensal	trimestral	semestral
Deslocamento angular (pêndulos)	Quinzenal	Semanal	mensal	mensal
Deslocamento relativo (medidores de junta)	semanal	duas semanais	quinzenal	mensal
Deformação interna	semanal	duas semanais	semanal	mensal
Tensão	semanal	duas semanais	semanal	mensal
Temperatura do concreto	semanal	Semanal	quinzenal	mensal
Pressão intersticial no concreto	semanal	duas semanais	quinzenal	mensal
Carga (cabos de protensão)	diárias durante a protensão	duas semanais	Semanal	mensal
Subpressão na fundação	semanal	três semanais	duas semanais	Quinzenal (*)
Vazão de infiltração	-	Diárias	três semanais	semanal

2.6. Aquisição e Processamento dos Dados da Instrumentação

Os dados da instrumentação são coletados pelo pessoal treinado especificamente para esta finalidade, que devem ser capazes de reconhecer e relatar imediatamente todas as anomalias nas leituras ou nas medidas. Os dados da observação do desempenho devem ser corretamente armazenados de forma a

facilitar a leitura dessas informações quando necessário (FEDERAL GUIDELINES FOR DAM SAFETY, 2004).

Para isso, os armazenamentos das informações são feitos ordem cronológica das leituras do aparelho/instrumento em banco de dados específicos, onde ocorre uma validação das leituras através de técnicas determinísticas e/ou estatísticas. (ELETRONORTE, 2006).

Através da análise dessas informações, e por comparação com os modelos e hipóteses adotadas na fase de projeto, e por analogia com outras obras similares, chega-se às conclusões sobre o nível de segurança da estrutura.

3. ANÁLISE DE CORRELAÇÃO COM TESTE DE SIGNIFICÂNCIA

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão teórica sobre o coeficiente de correlação de Pearson, o coeficiente de correlação amostral e os testes de hipóteses para coeficiente de correlação amostral, com enfoque nos aspectos matemáticos que foram utilizados nesta dissertação.

3.2 Conceito Básico de Correlação Linear

Supondo que X e Y sejam duas variáveis aleatórias e que se deseja investigar seu possível relacionamento, um diagrama de dispersão mostra a localização dos pontos (X, Y) em um sistema de coordenadas cartesianas. Se todos os pontos desse diagrama situaram-se nas proximidades de uma reta, como nos exemplos da FIGURA 3.1, pode-se dizer que existe uma relação linear entre essas variáveis.

É possível determinar, de modo qualitativo, quão bem uma certa função representa a relação entre duas variáveis, mediante a observação direta do próprio diagrama de dispersão. Por exemplo, nota-se que uma linha reta é muito mais conveniente para representar a relação entre X e Y , para os dados da FIGURA 3.1(a), do que para os da FIGURA 3.1(b), graças ao fato de haver menor dispersão em torno da reta da FIGURA 3.1(a).

Para determinar de modo quantitativo quão bem uma certa reta representa a relação entre duas variáveis, é necessário estabelecer o coeficiente de correlação entre X e Y .

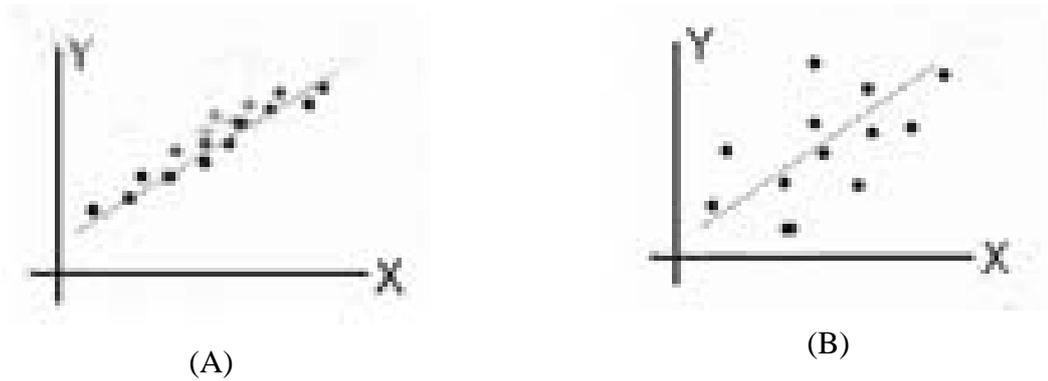


FIGURA 3.1: AMOSTRAS DE (X,Y)

(A): BAIXA DISPERSÃO EM TORNO DA RETA; (B): ALTA DISPERSÃO EM TORNO DA RETA

3.3 Coeficiente de Correlação de Pearson

Em estatística, o coeficiente de correlação de Pearson, também chamado de "coeficiente de correlação produto-momento" ou simplesmente de "r de Pearson", é utilizado para medir a intensidade do relacionamento existente entre duas variáveis aleatórias.

Considerando-se duas variáveis aleatórias X e Y, onde x representa os valores da variável X, y representa os valores da variável Y, com médias e variâncias μ_x , σ_x^2 e μ_y , σ_y^2 respectivamente, e covariância $\sigma_{xy} = \text{Cov}[x,y]$ define-se o coeficiente de correlação de X e Y como apresentado na equação (3. 1).

$$\rho(X,Y) = \frac{\text{Cov}[X,Y]}{\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}} = \frac{\sigma_{x,y}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3. 1)$$

Onde

$$\sigma_x^2 = E[(x - \mu_x)^2] \quad (3. 2)$$

$$\sigma_y^2 = E[(y - \mu_y)^2] \quad (3. 3)$$

$$\sigma_{xy} = \text{Cov}[X,Y] = E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)] \quad (3. 4)$$

No denominador de $\rho(X,Y)$, os desvios padrões das variáveis X e Y , têm o papel de padronizar a covariância entre x e y , tornando-a um valor comparável e no intervalo de -1 a 1 . O coeficiente de correlação mede a possível relação linear existente entre as variáveis aleatórias, de maneira que:

- a) $\rho(X,Y)$ é sempre um valor entre -1 e 1 ;
- b) Quanto maior a tendência de uma relação linear positiva, $\rho(X,Y)$ tem valor mais próximo de 1 ;
- c) Quanto maior a tendência de uma relação linear negativa, $\rho(X,Y)$ tem valor mais próximo de -1 ;
- d) Quando $\rho(X,Y)$ está próximo de zero, não existe relação linear.

Os gráficos apresentados na FIGURA 3.2 ilustram várias amostras de variáveis aleatórias, com diferentes coeficientes de correlação.

A FIGURA 3.1(a) e a FIGURA 3.1(b) mostram uma forte relação linear entre X e Y , sendo os valores dos coeficientes próximos de 1 e -1 , respectivamente. Na situação ilustrada na FIGURA 3.1(a), à medida que uma variável cresce a outra também cresce, de uma forma linear quase perfeita. Na situação ilustrada na FIGURA 3.1(b), à medida que uma variável cresce a outra decresce, de uma forma linear também quase perfeita.

Verificando o gráfico de dispersão entre as variáveis X e Y nas FIGURA 3.2(c) e 3.2(d), verifica-se certa relação entre X e Y , porém, não tão forte quanto o caso anterior. A FIGURA 3.2(e) e a FIGURA 3.2(f) mostram que X e Y possuem uma dependência muito fraca entre si. A inexistência de uma relação entre X e Y é muito clara na FIGURA 3.2(g), sendo o coeficiente de correlação um valor bem próximo de zero. Na FIGURA 3.2(f), o coeficiente de correlação bem próximo de zero, portanto, a relação linear pode ser descartada. No entanto, podemos visualizar a existência de uma possível relação quadrática entre X e Y .

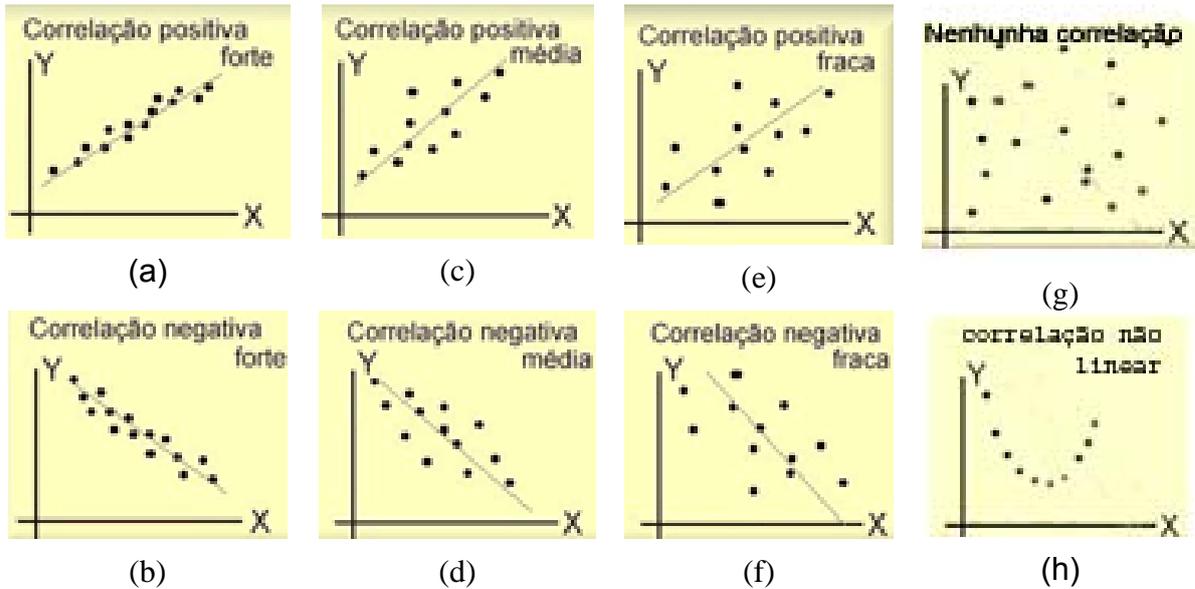


FIGURA 3.2: AMOSTRAS DE (X,Y)

3.4. Coeficiente de Correlação Amostral

Para se estimar o parâmetro $\rho(X,Y)$, n pares de valores (X, Y) de duas variáveis aleatórias proveniente da população de todos os pares possíveis. Como há duas variáveis envolvidas, esta população é denominada bidimensional e muitas vezes ela apresenta uma distribuição normal bidimensional.

Assim, pode-se pensar no coeficiente de correlação de uma população teórica representada por ρ , que é estimado a partir do coeficiente de correlação amostral $\hat{\rho}$. O coeficiente de correlação amostral entre X e Y é definido pela equação (3.5).

$$\hat{\rho}(X,Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.5)$$

onde \bar{x} é a média aritmética das amostras de X e que se estima μ_x , \bar{y} é a média das amostras de Y e que se estima μ_y .

O teste de significância, ou de hipótese concernentes ao parâmetro ρ , exige o conhecimento da distribuição amostral de $\hat{\rho}$. Para $\rho = 0$, esta distribuição é simétrica e pode-se utilizar uma estatística que tem uma distribuição t de Student.

Para $\rho \neq 0$, a distribuição é assimétrica. Neste caso, uma transformação devido a Fischer produz uma estatística aproximadamente Gaussiana.

Os n pares de valores (X,Y) de duas variáveis pode ser pensado como amostras de uma população de todos pares possíveis. Uma vez que duas variáveis são envolvidas, ela é chamada de uma população bivariada, e é suposto ser uma distribuição bivariada Gaussiana. Pode-se pensar em uma população teórica de coeficiente de correlação $\hat{\rho}$, estimado com base na amostra de n pares. Teste de significância ou hipótese com respeito ao valor do parâmetro ρ requer o conhecimento da distribuição amostral da estatística $\hat{\rho}$. Para $\rho = 0$ esta distribuição é simétrica e a estatística tem a distribuição de Student aproximada. Para $\rho \neq 0$, a distribuição é alongada e neste caso uma transformação desenvolvida por Fisher produz uma estatística que é aproximadamente Gaussiana. Os testes seguintes resumem os processos relativos a estes procedimentos.

3.4.1 Teste da hipótese nula $\rho = 0$

Este teste é usado quando se quer verificar se o coeficiente de correlação amostral obtido difere significativamente de zero. Para isso usa-se a estatística apresentada na eq. 3.6 que tem uma distribuição “t” de Student com $(n-2)$ graus de liberdade.

$$t = \frac{\hat{\rho}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\hat{\rho}^2}} \sim t_{n-2} \quad (3.6)$$

3.4.2 Teste da hipótese $\rho = \rho_0 \neq 0$

Este teste é usado quando se quer testar a hipótese de que a correlação ρ seja igual a um suposto valor ρ_0 , para isso usa-se a estatística dada pela equação (3.7) que é denominada transformação Z de Fisher.

$$Z = \frac{1}{2} \log_e \left(\frac{1+\hat{\rho}}{1-\hat{\rho}} \right) \quad (3.7)$$

em que $e=2,71828\dots$, tem uma distribuição aproximadamente normal, com a média e o desvio padrão calculados pelas equações (3. 8) e (3. 9) respectivamente.

$$\mu_z = \frac{1}{2} \log_e \left(\frac{1 + \rho_0}{1 - \rho_0} \right) \quad (3. 8)$$

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}} \quad (3. 9)$$

As equações (3. 7), (3. 8) e (3. 9) podem também ser utilizadas para encontrar limites de confiança para o coeficiente de correlação, e para determinar se dois coeficientes de correlação estimados, $\hat{\rho}_1$ e $\hat{\rho}_2$, tirados de amostras de tamanhos n_1 e n_2 , respectivamente, diferem significativamente entre si, ou seja testar a hipótese nula $H_0 \rho_1 = \rho_2$.

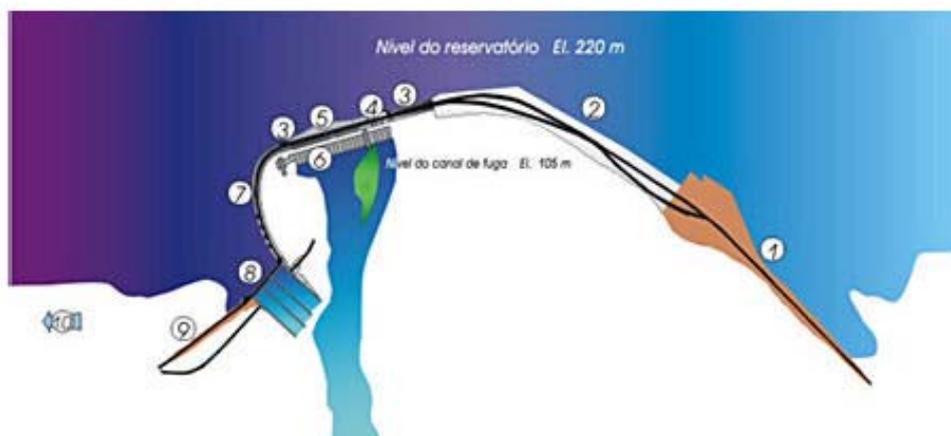
4. METODOLOGIA

4.1. Introdução

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia adotada neste trabalho, baseada em procedimentos simples de cálculo de correlações, contudo levando-se em conta a confiabilidade das correlações encontradas através dos valores P e Z relacionados às mesmas. São propostas correlações entre as séries temporais de leituras de instrumentos de barragens e entre estas leituras e as medidas de variáveis ambientais. Também neste capítulo descrevem-se as características da Barragem de ITAIPU e de seu sistema de instrumentação geotécnico-estrutural, que foi usado como exemplo de aplicação da metodologia proposta. Ainda justifica-se a escolha de determinados instrumentos para as análises.

4.2. Usina Hidrelétrica de Itaipu

A hidrelétrica de ITAIPU é um empreendimento binacional desenvolvido pelo Brasil e pelo Paraguai no Rio Paraná no trecho de fronteira entre os dois países, 14 km ao norte da Ponte da Amizade. A área do projeto se estende desde Foz do Iguaçu, no Brasil, e Ciudad del Este, no Paraguai, ao sul, até Guaíra (Brasil) e Salto del Guairá (Paraguai), ao norte. A potência instalada da Usina é de 14.000 MW (megawatts), com 20 unidades geradoras de 700 MW cada. No ano 2000, a usina atingiu o seu recorde de produção de 93,4 bilhões de quilowatts-hora (kWh), sendo responsável pela geração de 95% da energia elétrica consumida no Paraguai e 24% de toda a demanda do mercado brasileiro. A área onde está localizada a usina não é considerada parte do Brasil nem do Paraguai, tendo jurisdição própria. A barragem possui uma extensão de 7.700 m e altura máxima de 196 m. É composta de trechos construídos em concreto, enrocamento com núcleo de argila e terra, como pode ser observado na Figura 4.1. A área alagada de seu reservatório é de 1350 km² (ITAIPU,2006).



FONTE: (ITAIPU, 2006)

FIGURA 4.1: PLANTA DO COMPLEXO ITAIPU. AS ESTRUTURAS NUMERADAS SÃO: 1) BARRAGEM DE TERRA A MARGEM ESQUERDA, 2) BARRAGEM DE ENROCAMENTO, 3) BARRAGENS DE LIGAÇÃO, 4) ESTRUTURA DE DESVIO, 5) BARRAGEM PRINCIPAL, 6) CASA DE FORÇA, 7) BARRAGEM LATERAL DIREITA, 8) VERTEDOIRO, 9) BARRAGEM DE TERRA NA MARGEM DIREITA.

4.3. Sistema de Monitoração Geotécnico-Estrutural da Usina Hidrelétrica de ITAIPU

No caso de ITAIPU, a grande maioria dos instrumentos de monitoração geotécnico-estrutural foi instalada e tem suas leituras realizadas desde a fase de construção da barragem. A leitura desses instrumentos é efetuada em diferentes frequências (diária, semanal, quinzenal, mensal), de acordo com o ICOLD (MATOS, 2002). Conta-se também com a monitoração dos dados hidro-meteorológicos, realizada através de algumas estações que são da própria Itaipu e de outras entidades, como a Companhia Paranaense de Energia (Copel), Agência Nacional de Águas (ANA), Operador Nacional do Sistema (ONS) e Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar) e da paraguaia Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC). (ITAIPU,2006).

A Barragem de Itaipu é composta por dois trechos de barragens de terra, um trecho de barragem de enrocamento e um trecho de concreto. Em toda sua extensão, são encontrados cerca de 2200 instrumentos e 5200 drenos, no concreto e na fundação (ITAIPU, 2006). Foram escolhidos blocos chaves ao longo da barragem para a instalação dos mesmos. Alguns desses instrumentos coletam dados de 1979 até os dias de hoje (PORTO, 2006).

Os instrumentos encontrados ao longo da barragem são:

- a) Concreto: roseta de deformímetro, roseta de tensômetro, tensômetro, termômetro na massa, medidor de junta interno, base de alongâmetro na

parede, base de alongâmetro no piso, pêndulo direto, pêndulo invertido, termômetro de superfície (RIC, 2005).

- b) Fundação: piezômetro, extensômetro de haste, medidor triortogonal, medidor de nível d'água, medidor de vazão, dreno (RIF, 2005).

Em sua maioria, os instrumentos foram fabricados pelas empresas RST Instruments e CESP – Companhia Energética de São Paulo (RIT, 2005). Esses fabricantes todo ano lançam novos equipamentos para a auscultação de barragens no mercado.

Em 2005, Itaipu concluiu a implantação do sistema de aquisição automática de dados, em cerca de 210 instrumentos. Esses instrumentos foram selecionados pelo corpo de engenheiros, tendo-se em vista sua importância no diagnóstico da segurança das estruturas, devido à sua localização, seus resultados no passado, entre outras razões (Itaipu, 2006).

A parte selecionada na foto abaixo (fig. 4.2) é do trecho de concreto com tomada de água, por onde passa a água que movimenta as turbinas para a geração de energia. Trata-se do trecho com maior altura de coluna de água da barragem e, portanto, um dos mais críticos. Esta parte é referenciada como trecho F.

O trecho F é constituído de vários blocos, sendo que cada um deles possui instrumentos que fornecem dados a respeito de seu comportamento físico, tanto na estrutura de concreto como na sua fundação. Nas TABELA 4.1 e 4.2, podem-se observar os tipos e quantidades de instrumentos instalados no concreto e na fundação dos blocos do trecho F.



FONTE: ITAIPU, 2006

FIGURA 4.2: VISTA AÉREA DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU, CIRCULADO O TRECHO F.

TABELA 4.1: NÚMERO DE INSTRUMENTOS NOS BLOCOS DO TRECHO F – CONCRETO

RESUMO - CONCRETO							
INSTRUMENTO	Sigla	BLOCO - F					Total por instrumentos
		5/6	13/14	15/16	19/20	35/36	
Rosetas de Deformímetros	RD	4	-	-	11	-	15
Tensômetro	TN	1	-	-	4	-	5
Rosetas de Tensômetros	RT	2	-	-	6	-	8
Medidor de Junta Interno	JM	-	-	-	7	-	7
Pêndulo Direto	PD	5	6	-	6	4	21
Pêndulo Invertido	PI	3	1	1	1	-	6
Termômetro na Massa	TM	3	-	-	17	3	23
Termômetro de Superfície	TS	2	-	-	6	2	10
Total por bloco		20	7	1	58	9	95

FONTE: ITAIPU, 2006

TABELA 4.2: NÚMERO DE INSTRUMENTOS NOS BLOCOS DO TRECHO F – FUNDAÇÃO

		RESUMO - FUNDAÇÃO																
INSTRUMENTO		BLOCO F															Total por instrumento	
		1/ 2	3/ 4	5/ 6	7/ 8	9/ 10	11/ 12	13/ 14	15/ 16	17/ 18	19/ 20	21/ 22	23/ 24	27/ 28	29/ 30	31/ 32		35/ 36
Piezômetro Standpipe	PS	-	4	6	5	-	6	7	3	6	8	-	4	10	-	6	9	74
Piezômetro Geonor	PG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Extensômetro de haste	EM	4	-	1	-	-	-	3	5	4	3	1	-	4	-	-	4	29
Medidor de Aterro	MA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Medidor triortogonal	MT	-	1	-	-	1	4	1	1	-	-	1	1	-	-	1	-	11
Célula de Pressão Total	CL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Medidor de vazão	MV	-	1	-	-	-	2	-	2	-	-	2	1	-	1	-	-	9
Drenos	DR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Medidor de nível d' água	PZ	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	4
Total por bloco		4	6	7	5	1	12	12	12	11	12	4	6	14	1	7	13	127

FONTE: ITAIPU, 2006

4.4. Instrumentos e Período Analisados

Nas análises realizadas nesta dissertação, com exceção das rosetas de deformímetro, foram usadas as leituras de todos os instrumentos localizados nos blocos 19/20 do trecho F (concreto e fundação). O estudo foi restringido a esses blocos por serem os mais importantes da barragem e os mais instrumentados. O fato de não incluir nas análises as rosetas de deformímetro foi baseado no depoimento dos engenheiros da ITAIPU, que comentaram que tais instrumentos, após mais de vinte anos de uso, podem não gerar mais leituras confiáveis.

Procurou-se levar em conta os dados hidro-meteorológicos a fim de se entenderem suas influências nas medidas desses instrumentos.

Apesar de se dispor das leituras de 1986 a 2006, restringiram-se os dados aos últimos 10 anos (1996 a 2006) por sugestão da equipe de engenharia civil de Itaipu, pois os dados muito antigos poderiam incluir características que já não estão presentes ou que foram peculiares daquela época.

4.5 Preparação dos Dados

Os dados com as leituras dos instrumentos de Itaipu encontravam-se organizados em arquivos de formato texto. Cada um dos instrumentos da barragem foi identificado durante a fase de projeto com uma sigla. Após sua instalação e posterior funcionamento, estes instrumentos receberam outra denominação, também em forma de sigla, diferente daquela usada na fase de projeto. Este fato dificultou de certa maneira a identificação inicial de cada instrumento. Desta forma, foi construído um banco de dados em formato Excel, onde se procurou relacionar as informações de projeto com as constantes nos arquivos texto das leituras dos instrumentos. Este banco de dados foi montado baseado nas pranchas do projeto original de Itaipu e de relatórios técnicos relacionados à instrumentação da barragem. Maiores detalhes podem ser encontrados em Andraos, 2006 e Sanches, 2006.

A Figura 4.3 mostra um exemplo de como os dados encontravam-se organizados originalmente, em grandes arquivos textos contendo as séries históricas das leituras de todos os instrumentos, onde as colunas armazenam respectivamente: o código do instrumento, a data e hora da leitura, e as medições obtidas, nesse caso é de um pêndulo direto, onde as duas ultimas colunas são as leituras obtidas.

Também foi necessário entender como são obtidas em campo as medidas dos instrumentos aqui avaliados e o significado de cada grandeza obtida por eles.

Verificou-se que cada tipo de instrumento possuía uma periodicidade de leituras (diária, semanal, mensal e trimestral), e que são feitas campanhas de leituras de instrumentos de mesma família, ou seja, primeiro se faz a leitura de todos os instrumentos tipo “a”, depois todos do tipo “b”, desta forma até se obterem as leituras de todos os instrumentos. Nos procedimentos realizados neste trabalho, onde se busca comparar as leituras entre instrumentos, não houve problemas em fazer comparações entre instrumentos do mesmo tipo, já que as leituras em sua maioria eram feitas no mesmo dia, algumas com intervalo máximo de dois dias. Contudo, houve dificuldade em obter leituras de instrumentos diferentes ocorridas no mesmo dia, o que poderia inviabilizar uma comparação entre as leituras desses instrumentos.

```

COF21 ;19/05/1982;0800; 4.00; -4.80
COF21 ;23/05/1982;0830; 4.10; -4.70
COF21 ;26/05/1982;0840; 4.00; -4.70
COF21 ;28/05/1982;0815; 3.90; -4.60
COF21 ;31/05/1982;0815; 3.90; -4.80
COF21 ;02/06/1982;0830; 4.10; -4.80
COF21 ;04/06/1982;0830; 4.10; -4.80
COF21 ;07/06/1982;0840; 4.10; -4.80
COF21 ;09/06/1982;0820; 4.10; -4.70
COF21 ;11/06/1982;0820; 4.20; -4.90
COF21 ;14/06/1982;1005; 4.10; -4.90
COF21 ;16/06/1982;0810; 4.20; -4.80
COF21 ;18/06/1982;0800; 4.10; -4.70
COF21 ;21/06/1982;0830; 4.10; -4.70
COF21 ;25/06/1982;0845; 4.20; -4.60
COF21 ;28/06/1982;0830; 4.10; -5.00
COF21 ;30/06/1982;0836; 4.10; -4.80
COF21 ;02/07/1982;0840; 4.20; -4.80
COF21 ;05/07/1982;0845; 4.10; -4.90
COF21 ;07/07/1982;0815; 4.00; -5.00
COF21 ;09/07/1982;0820; 4.30; -4.90

```

FONTES: ITAIPU, 2006

FIGURA 4.3: PARTE DE ARQUIVO TEXTO COM AS LEITURAS DO PÊNULO DIRETO COF21

Mostrou-se necessária a conversão do formato texto dos dados originais para formato Excel, compatível com o formato de entrada do programa Matlab, que foi usado posteriormente neste trabalho. O Matlab foi usado para o pré-processamento das leituras, construção de um conjunto de rotinas capazes de selecionar e agrupar dados dessas leituras de maneira rápida e respeitando condições necessárias para a validade das análises de correlações.

A seguir, podem ser observadas as quantidades de cada tipo de instrumento analisado, a frequência que ocorrem suas leituras, bem como o intervalo de dados disponível, o intervalo de dados abordados nas análises e o número de leituras obtidas para as análises.

- Pêndulo invertido

Há um instrumento desse tipo no bloco F equipado com um coordenômetro, referenciado abaixo pela TABELA 4.3.

TABELA 4.3: COORDINÔMETRO DO PÊNULO INVERTIDO PIF19 NOS BLOCOS F 19/20

Código dos instrumentos	Intervalo entre leituras	Intervalo de dados disponível	Intervalo de dados abordado.	Número de leituras obtidas.
COF23	mensais	10/1980 a 1/2006	1/1996 a 1/2006	131

- Pêndulo direto

Há um instrumento desse tipo no bloco F, equipado com seis coordenômetros relacionados abaixo pela TABELA 4.4.

TABELA 4.4: COORDINÔMETROS DO PÊNDULO DIRETO PDF19 NOS BLOCOS F 19/20

Código dos instrumentos	Intervalo entre leituras	Intervalo de dados disponível	Intervalo de dados abordado.	Número de leituras obtidas.
COF17, COF18, COF19, COF20, COF21, COF22.	mensais	10/1980 a 1/2006	1/1996 a 1/2006	131

- Bases de alongâmetro, na parede:

Existem 15 instrumentos desse tipo no bloco F, relacionados na TABELA 4.5.

TABELA 4.5: BASES DE ALONGÂMETRO NA PAREDE PRESENTE NOS BLOCOS F 19/20

Código do instrumento	Intervalo entre leituras.	Intervalo de dados disponível	Intervalo de dados abordado.	Número de leituras obtidas.
JSF51	Mensal	4/1980 a 2/2006	1/1996 a 2/2006	121
JSF52, JSF53, JSF54, JSF55, JSF56, JSF57, JSF58, JSF59, JSF60, JSF61, JSF62, JSF63, JSF64, JSF65, JSF66.	Trimestral	11/1980 a 12/2005	3/1996 a 12/2005	41

- Base de alongâmetro, no piso.

Há um instrumento desse tipo no bloco F, referenciado na TABELA 4.6.

TABELA 4.6: BASES DE ALONGÂMETRO NA PAREDE PRESENTE NOS BLOCOS F 19/20

Código do instrumento	Intervalo entre leituras.	Intervalo de dados disponível	Intervalo de dados abordado.	Número de leituras obtidas.
JSF50	Mensal	4/1980 a 2/2006	1/1996 a 2/2006	121

- Tensômetro Simples

Existem quatro instrumentos desse tipo no bloco F, relacionados na TABELA 4.7.

TABELA 4.7: TENSÔMETRO SIMPLES PRESENTES NOS BLOCOS F 19/20

Código dos instrumentos	Intervalo entre leituras.	Intervalo de dados disponível	Intervalo de dados abordado.	Número de leituras obtidas.
TNF21, TNF22, TNF23, TNF25	Mensal	11/1979 a 2/2006	1/1996 a 2/2006	122

- Medidor de junta interno

Existem sete instrumentos desse tipo no bloco F, relacionados na TABELA 4.8.

TABELA 4.8: MEDIDORES DE JUNTA INTERNO PRESENTE NOS BLOCOS F 19/20

Código dos instrumentos	Intervalo entre leituras.	Intervalo de dados disponível	Intervalo de dados abordado.	Número de leituras obtidas.
JIF10, JIF15, JIF16, JIF17, JIF21, JIF22	trimestral	4/1980 a 12/2005	1/1996 a 12/2005	41
JIF12	mensal	2/1980 a 1/2006	3/1996 a 1/2006	108

- Rosetas de tensômetro

Existem oito instrumentos desse tipo no bloco, relacionados na TABELA 4.9.

TABELA 4.9: ROSETAS DE TENSÔMETRO NOS BLOCOS F 19/20

Código dos instrumentos	Intervalo entre leituras	Intervalo de dados disponível	Intervalo de dados abordado.	Número de leituras obtidas.
RTF21, RTF22, RTF23, RTF24, RTF25, RTF26	mensais	3/1980 a 2/2006	1/1996 a 2/2006	121

- Termômetro de massa interno

Existem 16 instrumentos desse tipo no bloco F, relacionados na TABELA 4.10.

TABELA 4.10: TERMOMETRO DE MASSA INTERNO NOS BLOCOS F 19/20

Código dos instrumentos	Intervalo entre leituras	Intervalo de dados disponível	Intervalo de dados abordado.	Número de leituras obtidas.
TIF21, TIF22, TIF23, TIF24, TIF25, TIF26, TIF27, TIF28, TIF29, TIF30, TIF31, TIF32, TIF33, TIF34, TIF35, TIF36.	trimestrais	3/1980 a 12/2005	3/1996 a 12/2005	43

- Termômetro de superfície

Existem seis instrumentos desse tipo no bloco F, relacionados na TABELA 4.11.

TABELA 4.11: TERMÔMETROS DE SEPERFÍCIE NOS BLOCOS F 19/20

Código dos instrumentos	Intervalo entre leituras	Intervalo de dados disponível	Intervalo de dados abordado.	Número de leituras obtidas.
TSF11, TSF12, TSF13, TSF14, TSF15, TSF16	mensal	10/1980 a 2/2006	1/1996 a 2/2006	125

- Piezômetro

Existem oito instrumentos desse tipo no bloco F, relacionados na TABELA 4.12.

TABELA 4.12: PIEZÔMETROS NOS BLOCOS F 19/20

Código dos instrumentos	Intervalo entre leituras	Intervalo de dados disponível	Intervalo de dados abordado.	Número de leituras obtidas.
PSF71, PSF72, PSF75, PSF76, PSF77, PSF78	15 dias	12/1980 a 2/2006	1/1996 a 2/2006	255
PSF73, PSF74	7 dias	10/1980 a 2/2006	1/1996 a 2/2006	510

- Extensômetro

Existem 8 instrumentos desse tipo no bloco F, relacionados na TABELA 4.13.

TABELA 4.13: EXTENSÔMETRS NOS BLOCOS F 19/20

Código dos instrumentos	Intervalo entre leituras	Intervalo de dados disponível	Intervalo de dados abordado.	Número de leituras obtidas.
EMF21, EMF22, EMF23, EMF24	mensais	10/1980 a 1/2006	1/1996 a 1/2006	121

4.6. Seleção, Agrupamento dos Dados e Cálculo de Correlações

Antes do cálculo das correlações de interesse, foi necessário agrupar-se os dados dos instrumentos, bem como selecionar os dados de leituras de instrumentos, temperatura e nível de água correspondentes às datas que se queria relacionar.

Calcularam-se primeiramente as correlações entre instrumentos do mesmo tipo, pelo fato de se conseguir um bom número de leituras realizadas simultaneamente, obtendo resultados mais confiáveis. Já no caso de correlações entre instrumentos diferentes, em que as leituras nem sempre ocorrem no mesmo dia, foi necessário agrupar leituras com até um dia de diferença para se conseguir um número suficiente de leituras, tendo que haver verificações adicionais sobre a validade dos dados para as análises, realizando um novo cálculo de correlação. No caso das correlações entre os dados hidro-meteorológicos e instrumentos, não há esse tipo de problema, já que as leituras como temperatura ambiente e nível da água do reservatório são diários.

4.6.1 Correlação direta entre dois instrumentos

Para analisar a correlação entre duas séries de leituras, ou seja, verificar as possíveis relações entre elas, a princípio só haveria uma comparação válida se fossem consideradas as leituras ocorridas no mesmo dia. Porém, devido às diferentes periodicidades de leituras de instrumentos distintos, bem como a metodologia de campanhas de leituras adotada por Itaipu, as datas de leituras nem sempre coincidem.

Como exemplo, podem-se observar na parte das leituras de duas bases de alongômetros, indicados pelos códigos JSF51 e JSF52. As linhas coloridas indicam as leituras que ocorreram na mesma data. Estes dados foram agrupados em uma única matriz, como mostrado na Figura 4.5, e a partir desta matriz é que foram calculadas as correlações.

Converteram-se as datas em números, adotando-se o critério do *software* Microsoft Excel, que transforma uma data em número contando o número de dias a partir de 01/01/1900. Desta forma, foi possível inserir as datas nas análises, o que pode ser útil para captar tendências em longo prazo de leituras.

JSF51	9/1/1996	-2565	535	JSF52	12/3/1996	-23	-60
JSF51	5/2/1996	-2567	522	JSF52	11/6/1996	-32	-40
JSF51	12/3/1996	-2565	505	JSF52	10/9/1996	-58	-7
JSF51	16/4/1996	-2571	505	JSF52	9/12/1996	-47	-41
JSF51	14/5/1996	-2551	530	JSF52	11/3/1997	-35	-50
JSF51	11/6/1996	-2571	545	JSF52	16/6/1997	-32	-35
JSF51	9/7/1996	-2552	598	JSF52	16/9/1997	-47	-42
JSF51	12/8/1996	-2579	615	JSF52	5/12/1997	-43	-55
JSF51	10/9/1996	-2580	640	JSF52	17/3/1998	-33	-57
JSF51	15/10/1996	-2574	591	JSF52	15/6/1998	-36	-37
JSF51	12/11/1996	-2550	561	JSF52	14/9/1998	-53	-37
JSF51	10/12/1996	-2566	550	JSF52	9/12/1998	-40	-50
JSF51	18/2/1997	-2566	505	JSF52	16/3/1999	-33	-42
JSF51	11/3/1997	-2559	511	JSF52	15/6/1999	-36	-33
JSF51	15/4/1997	-2571	529	JSF52	13/7/1999	-44	-37
JSF51	12/5/1997	-2565	515	JSF52	14/9/1999	-65	-22
JSF51	16/6/1997	-2579	559	JSF52	7/12/1999	-59	-33

FIGURA 4. 4: PARTE DAS LEITURAS DOS INSTRUMENTOS JSF51 E JSF52

	JSF51 1	JSF52 2	JSF51 2	JSF52 2
12/3/1996	-2565	505	-23	-60
11/6/1996	-2571	545	-32	-40
10/9/1996	-2580	640	-58	-7
11/3/1997	-2559	511	-35	-50

FIGURA 4.5: LEITURAS AGRUPADAS EM UMA ÚNICA MATRIZ PARA CÁLCULO DE CORRELAÇÃO

Após a organização dos dados, foi obtido um número n de amostras dos dois instrumentos, onde x_i representa uma leitura obtida do instrumento X, y_i representa uma leitura obtida do instrumento Y, \bar{x} é a média aritmética das leituras do instrumento X, \bar{y} a média das leituras obtidas do instrumento Y. Mediante o emprego da eq. 4.1, calculou-se o coeficiente de correlação entre os instrumentos X e Y.

$$\hat{\rho}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4. 1)$$

Deve-se verificar se a correlação obtida entre X e Y difere significativamente de zero. Então testou-se a hipótese nula $H_0: \rho = 0$ contra a hipótese alternativa $H_1: \rho > 0$.

Para isso, usou-se a estatística apresentada na eq. 4.2

$$t = \frac{\hat{\rho}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\hat{\rho}^2}} \quad (4.2)$$

onde t tem uma distribuição “t” de Student, com $(n-2)$ graus de liberdade.

Com base em um teste unilateral com linha de corte, no nível de 0.05 (confiança de 95%). Dessa forma, rejeita-se H_0 quando. Rejeitar H_0 permite concluir que os instrumentos possuem correlação significativamente diferente de zero. Por outro lado, aceitar esta hipótese significa que os instrumentos não possuem correlação linear.

Utilizou-se o valor-p na decisão de rejeitar ou aceitar a hipótese nula H_0 . O valor-p correspondente risco p que se pode rejeitar H_0 e estar errado. Este risco ficou estabelecido ao longo do tempo em 5%. Portanto, quando o valor-p é menor que 0.05 rejeita-se H_0 e quando p maior ou igual a 0.05 aceita-se H_0 .

Considerando-se um valor p de 0,05 como o patamar para avaliar a hipótese de que a correlação seja igual a zero, ou seja, se há ausência de correlação entre as duas variáveis. Se o valor p for inferior a 0,05, pode-se rejeitar a hipótese nula, ou seja, a correlação é considerada significativamente diferente de zero. Em caso contrário, não se tem evidências que permitam rejeitar a hipótese nula (o que não significa automaticamente que seja verdadeira). Em situações de maior exigência, é usado um limite de valor p inferior a 0,05.

4.6.2 Analisando a validade do agrupamento de leituras efetuadas em datas diferentes para o cálculo de correlação

Devido às diferentes periodicidades de leituras e a adoção de sistemas de campanhas de leituras para serem obtidas medidas em instrumentos de mesmas famílias, as datas de leituras dos instrumentos nem sempre são coincidentes. Para alguns instrumentos, o número de leituras ocorridas em mesma data foi baixo. Com isso, certas análises poderiam gerar resultados duvidosos.

A fim de aumentar o número de dados nestes casos, onde o conjunto de leituras em mesma data era muito pequeno, propôs-se adotar tolerâncias de defasagem entre leituras de diferentes instrumentos de um até três dias. Porém, foi

necessária uma avaliação da validade deste procedimento e quais seria sua influência no cálculo das correlações.

Nas Figura 4.6 e 4.7, pode-se observar um agrupamento que une dados com mesma data dos instrumentos JSF51 e JSF52. Caso não sejam encontradas datas coincidentes, verifica-se se existe uma leitura com pelo menos um dia de diferença. Caso encontre, este é agrupado a matriz que se calcula a correlação. E assim foi feito com tolerâncias de até três dias, em busca de um número de dados suficientes para as análises pretendidas.

JSF51	9/1/1996	-2565	535		JSF52	12/3/1996	-23	-60
JSF51	5/2/1996	-2567	522		JSF52	11/6/1996	-32	-40
JSF51	12/3/1996	-2565	505		JSF52	10/9/1996	-58	-7
JSF51	16/4/1996	-2571	505		JSF52	9/12/1996	-47	-41
JSF51	14/5/1996	-2551	530		JSF52	11/3/1997	-35	-50
JSF51	11/6/1996	-2571	545		JSF52	16/6/1997	-32	-35
JSF51	9/7/1996	-2552	598		JSF52	16/9/1997	-47	-42
JSF51	12/8/1996	-2579	615		JSF52	5/12/1997	-43	-55
JSF51	10/9/1996	-2580	640		JSF52	17/3/1998	-33	-57
JSF51	15/10/1996	-2574	591		JSF52	15/6/1998	-36	-37
JSF51	12/11/1996	-2550	561		JSF52	14/9/1998	-53	-37
JSF51	10/12/1996	-2566	550		JSF52	9/12/1998	-40	-50
JSF51	18/2/1997	-2566	505		JSF52	16/3/1999	-33	-42
JSF51	11/3/1997	-2559	511		JSF52	15/6/1999	-36	-33
JSF51	15/4/1997	-2571	529		JSF52	13/7/1999	-44	-37
JSF51	12/5/1997	-2565	515		JSF52	14/9/1999	-65	-22

FIGURA 4.6: PARTE DAS LEITURAS DOS INSTRUMENTOS JSF51 E JSF52.

	JSF51 1	JSF52 2	JSF51 2	JSF52 2
12/3/1996	-2565	505	-23	-60
11/6/1996	-2571	545	-32	-40
10/9/1996	-2580	640	-58	-7
10/12/1996	-2566	550	-47	-41
11/3/1997	-2559	511	-35	-50

FIGURA 4.7: LEITURAS AGRUPADAS EM UMA ÚNICA MATRIZ UTILIZANDO UMA TOLERÂNCIA DE UM DIA.

Para se verificar se seria possível agrupar dados (leituras) que ocorreram em datas diferentes (até três dias de diferença) foi utilizada como base as leituras de instrumentos do mesmo tipo. As leituras dos instrumentos de mesmo tipo foram realizadas em “campanhas”, ou seja, efetuadas em um pequeno intervalo de dias. Desta forma, havia um bom número de leituras ocorridas no mesmo dia, pois era necessário um coeficiente de correlação confiável como base para a comparação com o coeficiente de correlação obtido a partir de leituras ocorridas em dias diferentes. Caso a correlação entre leituras ocorridas em dias diferentes for significativamente diferente da correlação entre leituras ocorridas no mesmo dia,

pode-se concluir que a inserção desses novos dados defasados alteram a relação real que existe entre os instrumentos, o que então geraria resultados errados em qualquer tipo de análise que aborde esses dados defasados. O desenvolvimento matemático do teste que verifica se existem diferenças entre dois coeficientes de correlação de amostras de tamanhos diferentes é descrito a seguir.

Primeiramente, agrupam-se as leituras dos instrumentos que ocorreram no mesmo dia, com isso obtendo-se um número n_1 de amostras, e a partir de cálculo $\hat{\rho}_1(X, Y)$, obtem-se a correlação entre os instrumentos X e Y.

$$\hat{\rho}_1(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n_1} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.2)$$

Em seguida, agruparam-se leituras dos instrumentos que ocorreram com até 3 dias de diferença, com isso obtendo-se um número n_2 de amostras e, a partir da expressão 4.5, calculou-se a correlação amostral $\hat{\rho}_2$ entre os instrumentos X e Y.

$$\hat{\rho}_2(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_2} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n_2} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.3)$$

Se as correlações $\hat{\rho}_1$ e $\hat{\rho}_2$ apresentarem valores significativamente diferentes em um teste, sabe-se que a tolerância de dias entre essas leituras altera a suposta relação existente entre esses instrumentos, o que indica que não poderia haver tolerância de dias para o cálculo de correlação que envolvesse esse instrumento.

Para determinar se dois coeficientes de correlação, $\hat{\rho}_1$ e $\hat{\rho}_2$, tirados de amostras de tamanhos diferentes n_1 e n_2 , diferem significativamente entre si, calculam-se Z_1 e Z_2 , mediante o emprego das expressões 4.6 e 4.7.

$$Z_1 = \frac{1}{2} \log_e \left(\frac{1 + \hat{\rho}_1}{1 - \hat{\rho}_1} \right) \quad (4.4)$$

$$Z_2 = \frac{1}{2} \log_e \left(\frac{1 + \hat{\rho}_2}{1 - \hat{\rho}_2} \right) \quad (4.5)$$

e testa-se as hipóteses $H_0 : \mu_{Z_1} = \mu_{Z_2}$ e $H_1 : \mu_{Z_1} \neq \mu_{Z_2}$. Para isto a estatística do teste é:

$$z = \frac{Z_1 - Z_2 - \mu_{Z_1 - Z_2}}{\sigma_{Z_1 - Z_2}} \sim \mu(0,1) \quad (4.6)$$

em que

$$\mu_{Z_1 - Z_2} = \mu_{Z_1} - \mu_{Z_2} \quad (4.7)$$

e

$$\sigma_{Z_1 - Z_2} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_z^2} = \sqrt{\frac{1}{n_1 - 3} + \frac{1}{n_2 - 3}} \quad (4.8)$$

Então, especificamente, tem-se:

$$z = \frac{Z_1 - Z_2 - 0}{\sqrt{\frac{1}{n_1 - 3} + \frac{1}{n_2 - 3}}} \sim \mu(0,1) \quad (4.9)$$

O teste aplicado é bilateral a estatística z tem uma distribuição normal. Rejeita-se H_0 ao nível de confiança de 95% somente quando $z > 1,96$ ou $z < -1,96$. A rejeição da hipótese H_0 implicaria na decisão de não agrupar os dados com tolerância de defasagem entre leituras, pois isso mostrou que a correlação se tornou significativamente diferente em relação à correlação abordada sem tolerância de dias. Caso contrário, pode-se utilizar as leituras dos dias anteriores como uma atual sem prejudicar a análises. Se o instrumento a ser analisado for único no bloco, o ideal é que se compare com um instrumento que possua um bom número de leituras e que possua uma correlação razoável com o instrumento. O restante do processo é análogo ao descrito no item 4.6.1, para o cálculo das correlações entre instrumentos do mesmo tipo.

4.7 Correlação entre leituras dos instrumentos e variáveis ambientais

Certamente os eventos hidro-meteorológicos influenciam no comportamento da barragem e, conseqüentemente, no resultado da leitura de vários instrumentos. O princípio da coincidência de datas de leituras para se calcular a correlação direta entre dados de variáveis ambientais e as leituras dos instrumentos é o mesmo descrito no tópico anterior, ou seja, são inseridas nas análises apenas leituras ocorridas em mesma data.

Mas sabe-se que a influência de condições ambientais na leitura dos instrumentos nem sempre ocorre imediatamente. Isto acontece pelo fato da barragem possuir grandes dimensões, ser composta por enorme volume de concreto e os instrumentos estarem instalados em diferentes posições na barragem, retardando de maneira diferenciada o tempo de resposta a modificações ambientais e, dependendo de sua posição, sofrendo maior ou menor influência destas variações. Algumas medidas ainda estão relacionadas com um acúmulo desses eventos, como por exemplo, a dilatação do concreto componente da barragem, que depende da frente de propagação de calor ao longo do corpo da mesma. Em uma parte interna da barragem, caso ocorra um dia de alta temperatura ambiente, não ocorrerá imediatamente tal dilatação. A propagação de calor ocorre de maneira lenta, e a dilatação resultante dependerá da quantidade de calor absorvida durante vários dias consecutivos.

Sabe-se que picos de temperaturas ou períodos de ocorrência de altas ou baixas temperaturas geram picos de deformação após algum tempo, detectados pela instrumentação em diferentes períodos de tempo. Desta forma, julgou-se importante quantificar este tempo de resposta à variação da temperatura e como esta variação influencia nas leituras dos instrumentos.

Para verificar a influência dos eventos passados nos resultados das leituras dos instrumentos da barragem, foram observados dois aspectos:

a) Correlação entre a leitura do instrumento e temperatura ambiente de dias passados:

Nesse tipo de análise, busca-se verificar a correlação entre a leitura de um instrumento e a temperatura ambiente de dias anteriores a essa leitura, para isso, foram agrupadas em uma matriz a leituras do instrumento de interesse, e a

cada leitura desse instrumento, foi agrupada a temperatura de dias atrás, para cada dia de atraso abordado é calculada a correlação, bem como o valor P.

Um exemplo que ajuda a entender a metodologia empregada é o descrito a seguir:

Na Figura 4.8, pode-se observar as leituras do instrumento base de alongâmetro JSF51 (coluna 1 mede abertura ou fechamento e coluna 2 deslizamento) e os da temperatura ambiente (coluna 1 mede a mínima, coluna 2 a média e coluna 3 a máxima). Caso se queira calcular a correlação entre determinada leitura de JSF51 e a temperatura de um dia atrás, agrupa-se numa matriz de dados as leituras de JSF51 com a temperatura de um dia atrás e, a partir dessa matriz, é calculada a correlação.

Leituras JSF51			Leituras Temperaturas			Matriz Agrupada					
...	
5/2/1996	-2567	522	2/2/1996	21,2	25,7	31,8	-2567	522	23,5	27,2	31,0
12/3/1996	-2565	505	3/2/1996	23,7	25,5	27,8	-2565	505	21,9	26,4	31,6
16/4/1996	-2571	505	4/2/1996	23,5	27,2	31,0	-2571	505	23,5	26,1	30,0
14/5/1996	-2551	530	5/2/1996	20,2	25,0	31,0	...	...	...	...	...
11/6/1996	-2571	545	6/2/1996	18,5	24,9	31,0					
9/7/1996	-2552	598	...	...	...	...	
12/8/1996	-2579	615	9/3/1996	21,6	27,2	33,6					
10/9/1996	-2580	640	10/3/1996	23,6	26,9	33,6					
15/10/1996	-2574	591	11/3/1996	21,9	26,4	31,6					
12/11/1996	-2550	561	12/3/1996	21,8	26,9	32,0					
10/12/1996	-2566	550	13/3/1996	20,0	24,4	31,0					
18/2/1997	-2566	505	...	...	...	...	
11/3/1997	-2559	511	13/4/1996	22,5	26,0	31,4					
15/4/1997	-2571	529	14/4/1996	22,0	26,0	31,4					
12/5/1997	-2565	515	15/4/1996	23,5	26,1	30,0					
...					

FIGURA 4.8: EXEMPLO DE AGRUPAMENTO DE DADOS PARA O CÁLCULO DE CORRELAÇÃO ATRASADA.

Foi criada uma rotina no Matlab que permitiu calcular várias correlações, uma para cada dia de atraso, até 150 dias, verificando para qual atraso encontrou-se a maior correlação. Tal resultado poderia explicar qual é o atraso (*delay*) que um instrumento apresenta a responder à variação pontual da temperatura.

b) Correlação entre a leitura do instrumento e a temperatura acumulada de dias passados:

Nesse tipo de análise, busca-se verificar a correlação entre a leitura de um instrumento e a temperatura acumulada de dias anteriores a essa leitura, para isso, foram agrupadas em uma matriz a leituras do instrumento de interesse, e a

cada leitura desse instrumento, foi agrupado o somatório da temperatura ambiente de dias atrás, para cada intervalo de acumulo abordado é calculado a correlação, bem como o valor P.

Um exemplo que ajuda a entender a metodologia empregada é o descrito a seguir.

Na Figura 4.9, pode-se observar as leituras do instrumento base de alongâmetro JSF51 e os da temperatura ambiente. Caso se queira calcular a correlação entre determinada leitura de JSF51 e a temperatura dos últimos três dias, agrupa-se a leitura do dia, e, como dado “temperatura” usa-se a soma dos últimos três dias (incluído o dia em questão) e, a partir dessa matriz, é calculada a correlação.

JSF51 AB/F				Temp. Média			Matriz Agrupada		
...
5/2/1996	522			2/2/1996	26		5/2/1996	522	78
12/3/1996	505			3/2/1996	26		12/3/1996	505	80
16/4/1996	505			4/2/1996	27		16/4/1996	505	72
14/5/1996	530			5/2/1996	25		...	...	...
11/6/1996	545			6/2/1996	25				
9/7/1996	598			...	..		
12/8/1996	615			9/3/1996	27				
10/9/1996	640			10/3/1996	27				
15/10/1996	591			11/3/1996	26				
12/11/1996	561			12/3/1996	27				
10/12/1996	550			13/3/1996	24				
18/2/1997	505			...	...		
11/3/1997	511			13/4/1996	26				
15/4/1997	529			14/4/1996	26				
12/5/1997	515			15/4/1996	26				
16/6/1997	559			16/4/1996	20				
14/7/1997	558			17/4/1996	15				
...				

FIGURA 4.9: EXEMPLO DE AGRUPAMENTO DE DADOS PARA O CÁLCULO DE CORRELAÇÃO ATRASADA.

Foi criada uma rotina no Matlab que calcula várias correlações, uma para intervalo acumulado, até 150 dias, e verificando para qual intervalo acumulado resultou a maior correlação. Tal resultado pode explicar a influência acumulada da temperatura ambiente nas leituras dos instrumentos, e quantificar o intervalo de tempo de temperaturas acumuladas atrasadas que melhor se relaciona com as leituras dos instrumentos.

5. RESULTADOS

5.1 Introdução

Os resultados das análises foram separados em três partes: correlação entre instrumentos de mesmo tipo, correlação do nível da água e temperatura ambiente com os instrumentos e correlação entre instrumentos de tipos diferentes.

No decorrer das análises, são apresentados os resultados das correlações baseadas em leituras ocorridas no mesmo dia e as correlações baseadas em leituras com até três dias de diferença, o intervalo de tempo abordado, além do número de leituras obtidas em cada caso e algumas interpretações dos resultados.

Como citado anteriormente, com exceção das rosetas de deformímetros, foram analisados todos os instrumentos dos blocos F 19/20, estabelecendo possíveis relações entre instrumentos de mesmo tipo e diferentes, bem como a influência dos dados hidro-meteorológicos na leitura desses instrumentos.

Também foi investigada a correlação de dados passados e acumulados (temperatura ambiente e N.A.) em relação ao valor presente de leitura de instrumentos.

Calcularam-se primeiramente as correlações entre instrumentos do mesmo tipo pelo fato de se conseguir um bom número de leituras realizadas simultaneamente, gerando resultados confiáveis, diferente do caso de correlações entre instrumentos diferentes, em que foi necessário agrupar leituras com até um dia de diferença para se conseguir um número suficiente de leituras. Neste caso, foi necessário realizar verificações adicionais sobre a validade dos dados para as análises. Para o cálculo das correlações entre os dados hidro-meteorológicos e instrumentos não há esse tipo de problema, já que as leituras como temperatura ambiente e nível da água são diários.

5.2 Análise de correlação entre instrumentos de mesmo tipo do bloco F19/20.

Neste tópico, foram verificadas as relações entre instrumentos de mesmo tipo no bloco, como se comportam entre si, se estão seguindo uma tendência no decorrer

do tempo, e a possibilidade de modificação de periodicidade de leituras dos instrumentos altamente correlacionados.

- **Bases de alongâmetro, na parede:**

Deve-se lembrar que bases de alongâmetro na parede medem duas grandezas: abertura e fechamento de juntas entre blocos e deslizamento. Nota-se que o instrumento JSF51 possui leituras mensais e os demais instrumentos deste tipo, trimestrais.

Foram alocados numa única matriz os dados de todos os instrumentos cujas leituras foram efetuadas na mesma data. Como nem todas as leituras foram feitas nos mesmos dias, essa matriz possui apenas 22 ocorrências. Notou-se que os instrumentos com periodicidade de leitura trimestral apresentavam 41 leituras feitas no mesmo dia, sendo que o JSF51 apresentava 121 leituras, das quais apenas 22 coincidiam com as demais.

Então foram agrupadas leituras com tolerâncias de até três dias de diferença, a fim de aumentar o número de leituras para um cálculo de correlação com mais dados. Com tolerância de um dia, o número de leituras aumentou de 22 para 41, para dois e três dias não houve aumento nos dados.

Comparando-se a matriz de correlação baseada nas 22 ocorrências e a matriz com 41 ocorrências, verificou-se que não houve uma variação das correlações significativamente diferentes de zero. Com isso, concluiu-se que podem ser utilizadas leituras com até um dia de atraso, sem grande prejuízo as análises. As matriz de correlação baseada na tolerância de um dia está no anexo 1.

Houve leituras que tiveram altas correlações com a data (JSF52 deslizamento, JSF53 deslizamento, JSF54 deslizamento, JSF55 deslizamento, JSF56 abertura ou fechamento, JSF60 abertura ou fechamento, JSF63 deslizamento, JSF65 deslizamento), mostrando que essas leituras estão aumentando ou diminuindo a certa taxa no decorrer do tempo (aumentando caso correlação positiva). Observando os gráficos dessas leituras, isso se confirmou, ou seja, observou-se forte tendência no decorrer do tempo, mas a uma pequena taxa, na ordem de milésimos de milímetros. As Figura 5.1 e 5.2, exemplificando esse caso, seguem abaixo (Figura 5.1 e 5.2).

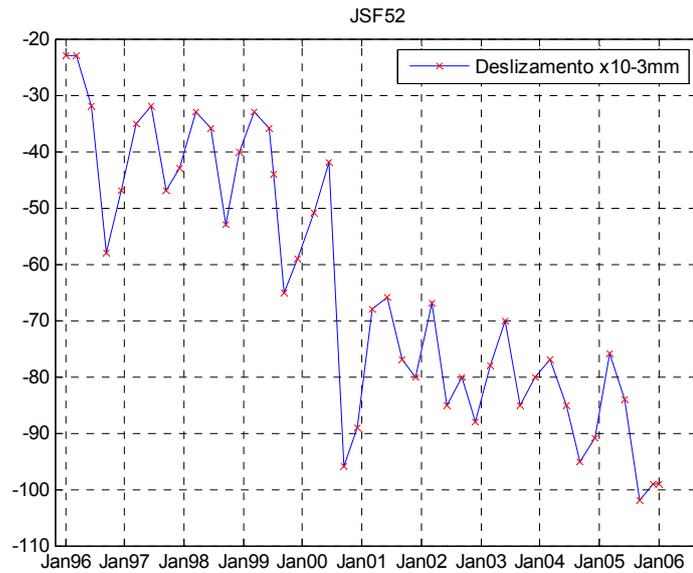


FIGURA 5.1: SÉRIE HISTÓRICA DE LEITURAS DA BASE DE ALONGÂMETRO JSF52 - DESLIZAMENTO.

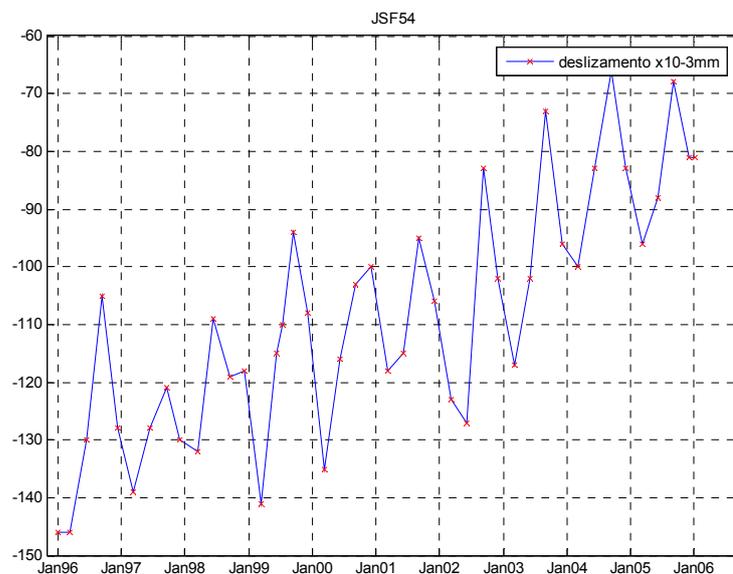


FIGURA 5.2. SÉRIE HISTÓRICA DE LEITURAS DA BASE DE ALONGÂMETRO JSF54 - DESLIZAMENTO.

Além das tendências ao longo do tempo, verificaram-se altas correlações entre várias leituras dos instrumentos, chegando-se à conclusão que a variação na leitura de um instrumento se propaga para os demais do mesmo tipo. Metade desses instrumentos apresentaram uma correlação muito próxima de 1, o que pode permitir reduzir o intervalo de leituras de até quatro dos quinze instrumentos, sem perda significativa de informação.

- **Base de alongâmetro, no piso**

Como não há outro instrumento do mesmo tipo para se comparar, foi calculada sua correlação com as bases de alongâmetro na parede.

Assim, conseguiram-se 22 leituras na mesma data e 45 leituras com um dia de tolerância. Ambos os resultados mostram que a medição de deslizamento de JSF50 possuiu uma correlação moderada com o tempo. Outro fato é que quando há variação na leitura desse instrumento na variável deslizamento, ela exerce uma influência significativa em outros quatro instrumentos nessa mesma variável deslizamento dos instrumentos JSF54, JSF55, JSF56 e JSF59. Porém, quando há variação da leitura abertura ou fechamento entre juntas, exerce uma influência na leitura de 8 dos 16 instrumentos, tanto na parte deslizamento quanto na parte abertura ou fechamento, sendo alguns com relação quase perfeita, podendo haver o aumento de periodicidade de leituras de alguns desses instrumentos sem perda significativa de informação.

Quanto à tolerância de dias entre leituras, baseado no teste estatístico, concluiu-se que se pode utilizar a tolerância de um dia com esses instrumentos, por manter as taxas de correlação estáveis. A matriz de correlação baseada nas 45 leituras está no anexo 2.

- **Pêndulo direto e Pêndulo invertido**

Deve-se lembrar que estes instrumentos medem dois movimentos: o deslocamento na direção do fluxo da água, e o normal ao fluxo da água.

Obtiveram-se 130 leituras ocorridas no mesmo dia, o aumento de tolerância não aumentou o número de dados. O que se pôde notar foi que o coordenômetro COF21 do pêndulo direto PDF19 e o coordenômetro COF21 do pêndulo invertido PIF19 apresentaram uma tendência de deslocamento moderada ao longo do tempo, mostrando pequenos deslocamentos da direção normal ao fluxo. Todos os coordenômetros mostraram uma forte correlação na medida da direção do fluxo, algumas perfeitas, o que não aconteceu de maneira tão acentuada na direção normal ao fluxo. Os coordenômetros COF17 e COF21 estão fortemente correlacionados na leitura direção normal ao fluxo. Não é possível sugerir mudança de periodicidade de alguma medida, pois a correlação perfeita (muito próxima do valor um) ocorreu em apenas uma das componentes do instrumento (ANEXO 10).

O pêndulo invertido possui uma correlação de 0,73 com o tempo (ANEXO 10), o que indica que à medida que o tempo passa está ocorrendo um deslocamento na direção do fluxo medida pelo pêndulo invertido, porém numa ordem de unidades de milímetros. Tal fato acontece pela fluência da fundação da barragem que ocorre na direção de jusante.

- **Tensômetro Simples**

Obtiveram-se 90 leituras ocorridas no mesmo dia, 109 leituras com um dia de tolerância, e 121 leituras com dois dias de leituras.

Verificou-se que os termômetros dos tensômetros são altamente correlacionados, indicando uma uniformidade nas suas leituras. Isso se deve ao fato de estarem próximos entre si. A temperatura de um instrumento influi na leitura da tensão do mesmo instrumento apenas nos TNF25 e TNF23. As tensões medidas pelos TNF21 e TNF22 possuem uma correlação moderada.

Adotando tolerância de um dia de diferença entre realização de leituras, não houve mudança significativa das correlações. Porém, para dois dias houve altas variações, o que impediu do uso de tolerâncias de dois dias em análises que envolviam esse tipo de instrumento. O anexo 3 mostra a correlação dos tensômetros baseada nas 109 leituras.

Observou-se que alguns instrumentos desse tipo possuíam até quatro leituras consecutivas praticamente iguais. Um exemplo disso é o TNF21, que nos últimos 10 anos tem 121 leituras. Tendo as leituras periodicidade mensal, é um pouco estranho o fato de quatro meses terem leituras aproximadamente iguais. Este fato pode ser observado na Figura 5.3, que mostra a série histórica da tensão, com pontos grafados em vermelho, sobre a de temperatura ambiente, grafada em linha azul clara. Os círculos vermelhos marcam alguns trechos com repetição consecutiva de leituras.

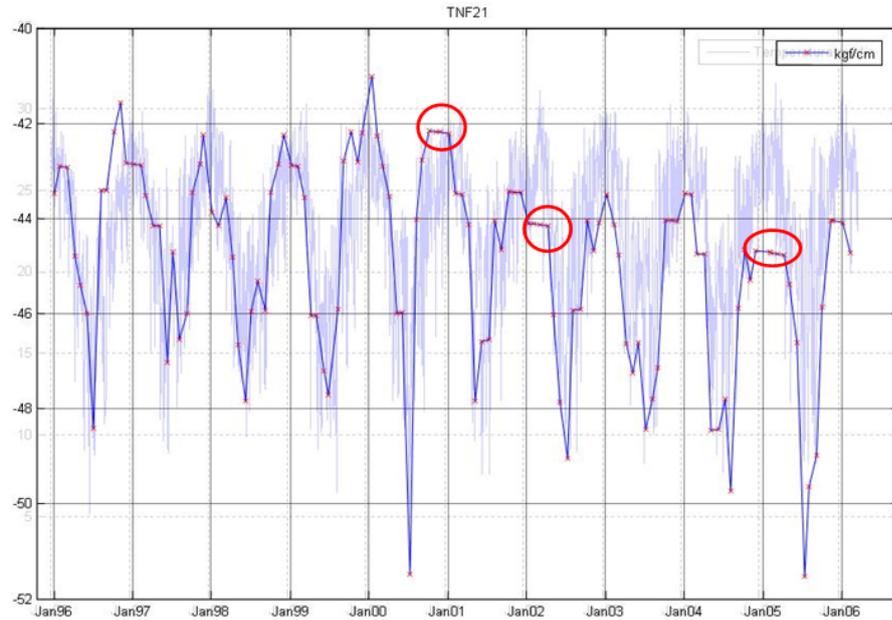


FIGURA 5.3: LEITURAS DO INSTRUMENTO TNF21 SELECIONADO LEITURAS APROXIMADAMENTE IGUAIS.

Devido às incertezas relativas às leituras consecutivas repetidas, criou-se uma nova série histórica de leituras, retirando todas essas leituras repetidas, o que resultou em 76 ocorrências, como apresentado na FIGURA 5.4.

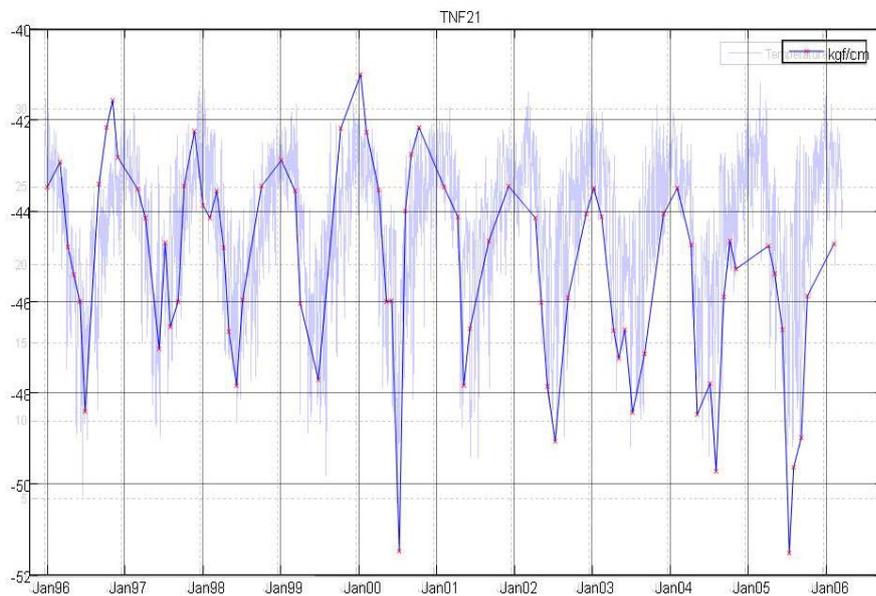


FIGURA 5.4: LEITURAS DO INSTRUMENTO TNF21 RETIRADO LEITURAS APROXIMADAMENTE IGUAIS.

Foi feito um novo cálculo de correlação com a série reduzida e, mesmo retirando as repetições, as correlações não se alteraram significativamente em relação às correlações com os dados originais, o que implica na validade das correlações mesmo com leituras de caráter incerto.

- **Medidor de junta interno**

Este instrumento mede duas grandezas: temperatura e abertura ou fechamento de juntas de blocos.

Agrupando apenas leituras ocorridas em mesma data, sem tolerância, obtiveram-se 31 leituras e, com um dia de tolerância, 39 leituras.

Os termômetros destes instrumentos estão todos fortemente correlacionados, o que indica curtas distâncias entre si, além do fato de concluir que tais termômetros estão funcionando a contento.

As medidas de deslocamentos destes instrumentos possuem correlações consideradas fracas, não ultrapassando o valor de 0.5. Porém, baseando-se no teste P, concluiu-se que estas correlações são significativamente diferentes de zero, ou seja, não se pode garantir total independência linear entre as leituras, mas também não se pode propor uma modificação de periodicidade de leitura de instrumentos.

A correlação do deslocamento do JIF15 com o tempo resultou em -0.93, o que indica uma forte tendência de decréscimo com o tempo, como pode ser observado na FIGURA 5.5. As leituras dos demais instrumentos desse tipo se mantiveram estáveis. Como este segue um comportamento diferente dos demais do mesmo tipo, segue a sugestão de se fazer uma análise mais detalhada nesse instrumento, verificando se está funcionando corretamente.

Comparando as correlações sem tolerância com as de tolerância de um dia, pode-se dizer que não houve variações consideradas significativas. A matriz de correlação entre os medidores de junta baseada no agrupamento com um dia de tolerância está no anexo 4.

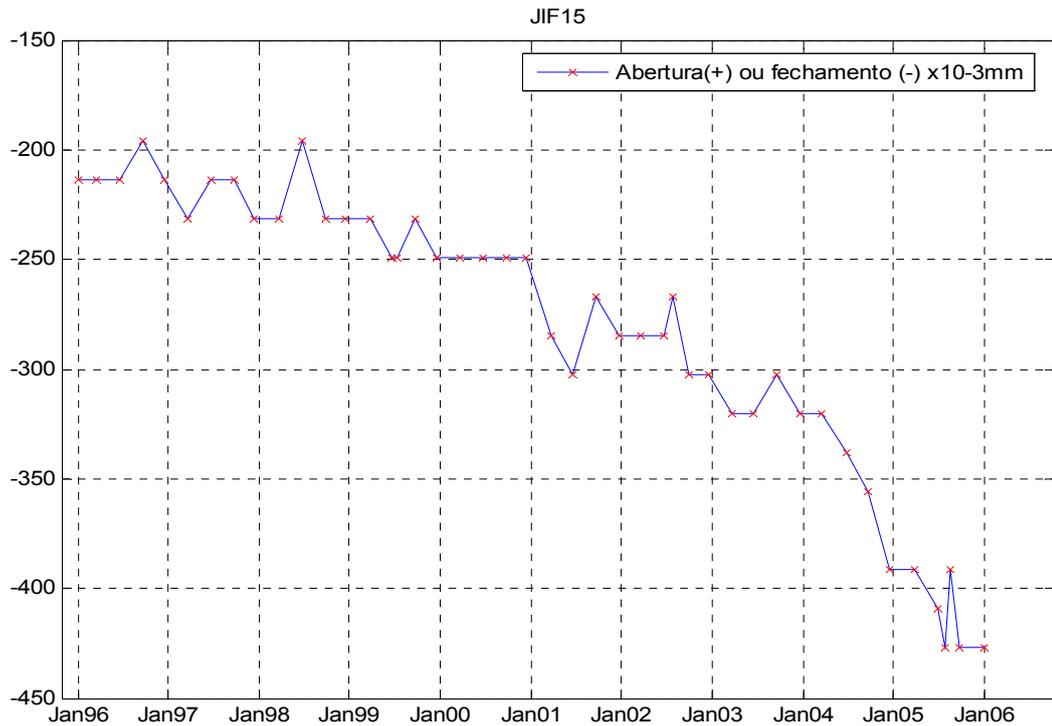


FIGURA 5.5: SÉRIE HISTÓRICA DAS LEITURAS DO INSTRUMENTO JIF15

- **Rosetas de tensômetro**

Cada instrumento deste tipo mede a tensão e temperatura. Obtiveram-se 90 leituras que ocorreram no mesmo dia, e 109 leituras com um dia de tolerância.

Nenhuma tendência temporal foi detectada nos instrumentos. Notou-se que a temperatura e a tensão na mesma direção do mesmo instrumento são fortemente correlacionadas, e os instrumentos RTF24, RTF25 e RTF26 são correlacionados em todas as suas medidas, indicando que são redundantes e apenas a leitura de um deles explicaria boa parte da variabilidade dos três. Os demais instrumentos apresentaram baixas correlações, indicando certa independência entre as leituras. Os testes estatísticos mostraram uma tolerância máxima de um dia. A matriz de correlação baseada nas 109 leituras se encontra no anexo 5.

- **Termômetro de massa interno**

Foram obtidas 28 leituras ocorridas no mesmo dia em todos os instrumentos, e 40 leituras quando se aceita diferenças entre leituras em até um dia. Comparando as duas correlações, se obteve as mesma conclusões. O teste estatístico permitiu o agrupamento entre leituras com até um dia de diferença.

Os instrumentos TIF30 e TIF31 possuem uma forte tendência de decréscimo no decorrer do tempo.

Os instrumentos TIF35 e TIF36 estão distantes dos demais instrumentos e por isso não sofrem ou não exercem muita influência nas leituras dos demais.

No restante dos instrumentos desse tipo, os próximos entre si possuem uma alta correlação.

- **Termômetro de superfície**

Apenas 16 leituras ocorreram no mesmo dia e, adotando uma tolerância de um dia, obtiveram-se 104 leituras. Apesar da grande diferença de leitura nos dois casos, o teste estatístico indicou que os coeficientes obtidos são aproximadamente iguais.

O instrumento TSF11 aparenta uma leve tendência de decréscimo ao longo do tempo.

Os instrumentos TSF12 e TSF13 apresentam uma correlação perfeita, podendo-se definitivamente descartar ou aumentar a periodicidade de leitura de um dos dois. Estes dois termômetros também estão fortemente correlacionados com o TSF15 e moderadamente correlacionados com o TSF16. O TSF14 está distante dos outros e por isso este tem baixas correlações com os instrumentos de mesmo tipo. A matriz de correlação baseada nas 104 leituras está no anexo 7.

- **Piezômetro**

Agrupando leituras ocorridas em mesma data, sem tolerância, obtiveram-se 234 leituras, e com um dia de tolerância, 248 leituras.

O instrumento PSF75 apresentou uma forte tendência de decréscimo nas leituras no decorrer do tempo, o PSF72, uma tendência moderada. Os PSF74, PSF76 e PSF77 possuem uma tendência de decréscimo de leituras considerada fraca.

Analisando qual o motivo que leva instrumento PSF78 não possuir correlação com nenhum dos instrumentos, verificou-se que esse instrumento tem suas leituras repetidas durante os últimos 10 anos, ou seja, provavelmente ele não está mais funcionando.

Entre os instrumentos PSF77 e PSF78 há uma correlação praticamente perfeita, podendo ser aumentada a periodicidade das leituras de um dos dois sem perda significativa de informação.

Há uma correlação forte entre o PSF72 e PSF75, e entre PSF73 e PSF74.

A matriz de correlação levando em conta leituras ocorridas em até um dia de diferença está no anexo 8.

- **Extensômetro**

O extensômetro EMF21 possui duas hastes, os demais possuem três hastes. Em todos os extensômetros, 109 leituras foram feitas no mesmo dia. Notou-se que todos os instrumentos não estão acomodados, o EMF21 tem os valores de suas leituras aumentando no decorrer dos 10 anos, o EMF22, EMF23 e EMF24 têm suas leituras reduzidas no decorrer dos 10 anos, somente a terceira haste do EMF24 não aparenta tendência em longo prazo.

Notou-se que os instrumentos EMF22, EMF23 e EMF24, possuem uma alta correlação positiva entre si, mostrando que se houver o aumento no valor da leitura de um instrumento, os outros dois aumentarão. É possível o aumento no tempo entre leituras consecutivas de dois destes instrumentos. O único extensômetro que se comporta de maneira diferente é o EMF21, que por possuir baixa correlação com os demais, provavelmente não sofre uma grande influência dos mesmos. A matriz de correlação entre esses instrumentos está no anexo 9.

5.3 Correlação entre eventos hidro-metereológicos e leituras dos instrumentos dos blocos F 19/20

Nesse tópico, analisou-se a correlação da temperatura ambiente e nível da água com alguns dos instrumentos do bloco F19/20. Tais análises buscaram verificar a existência ou não da influência desses eventos no resultado das leituras, tanto os eventos atuais como os eventos ocorridos em dias anteriores.

Essas análises tornaram necessário programar rotinas que fizessem sucessivos cálculos de correlações, um para cada período de atraso abordado ou cada período acumulado abordado.

Com isso, conseguiu-se quantificar os atrasos e intervalos acumulados de temperatura e nível da água em função de todos os instrumentos do bloco possibilitando uma maior compreensão da interação entre tais variáveis.

5.3.1 Correlação de temperatura ambiente e leituras dos instrumentos

Neste caso, optou-se por se mostrar os resultados obtidos com apenas três tipos de instrumentos: pêndulo direto, tensômetro simples e rosetas de tensômetros. Desta forma, pôde-se detalhar melhor os resultados encontrados e sua interpretação.

a) Pêndulo direto

Com o pêndulo direto pode-se realizar duas medidas: deslocamento na direção do fluxo e o deslocamento normal ao fluxo.

Observando a FIGURA 5.6, que apresenta a série de medidas do deslocamento na direção do fluxo (azul escuro) sobre a de temperatura ambiente (azul claro), nota-se facilmente que os picos do deslocamento na direção do fluxo medido pelo pêndulo direto ocorrem com certo atraso em relação à ocorrência dos picos de temperatura.

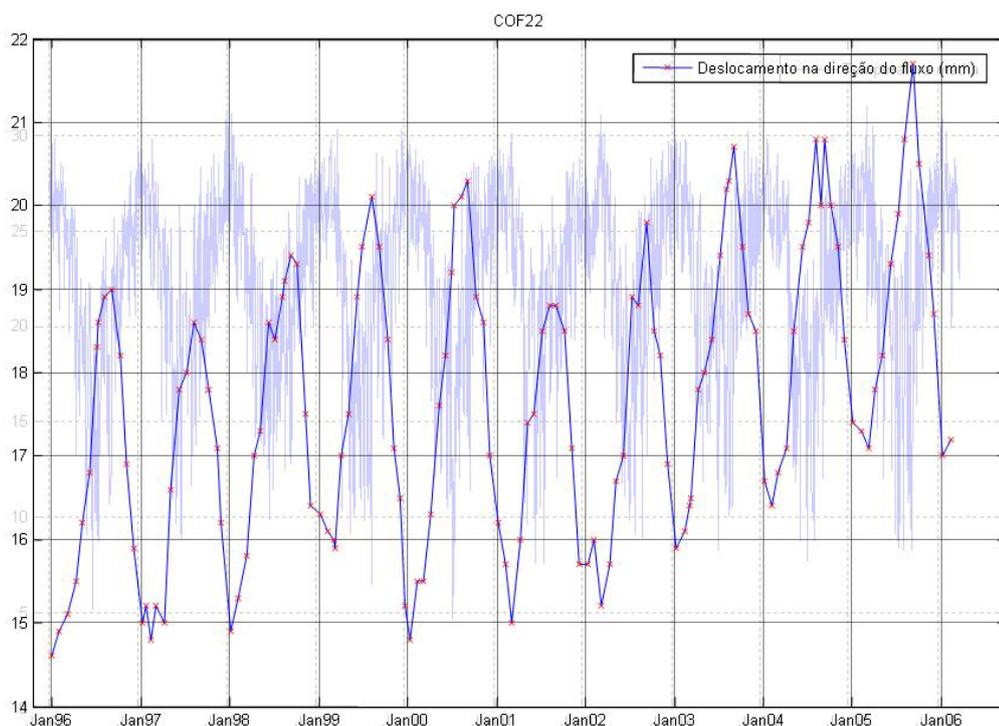


FIGURA 5.6: SÉRIE DE LEITURA DO COORDINÔMETRO COF22 DO PÊNDULO DIRETO (AZUL DEMARCADO COM VERMELHO) E A TEMPERATURA AMBIENTE (AZUL DESBOTADO)

A FIGURA 5.7 a seguir mostra como varia o valor da correlação entre a temperatura atrasada (de 1 até 120 dias) com o deslocamento na direção do fluxo. Observa-se que o valor da correlação vai diminuindo com a consideração do atraso na temperatura, até chegar a um valor mínimo, quando volta a subir novamente.

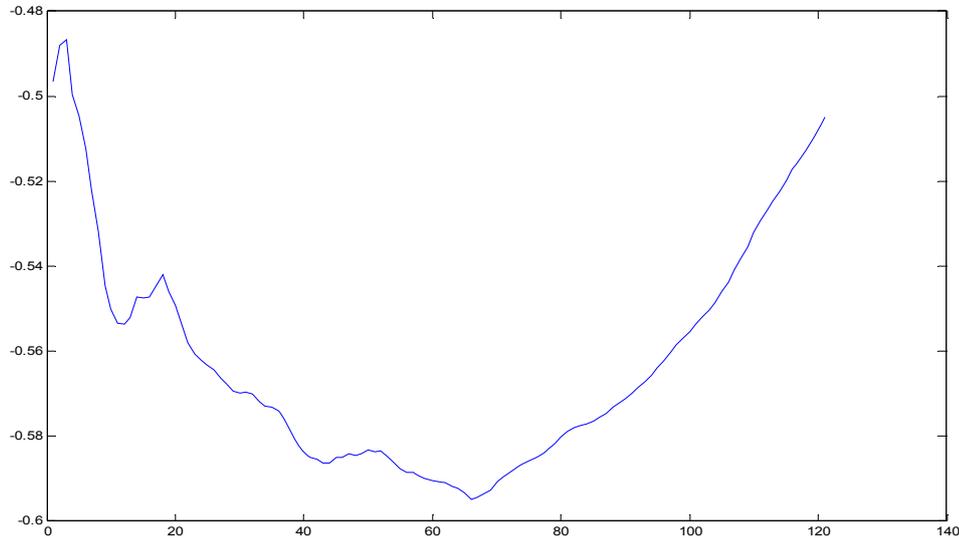


FIGURA 5.7: CORRELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DE DIAS ANTERIORES E O COORDINÔMETRO COF22

A correlação direta (entre leituras de datas coincidentes, do instrumento e de temperatura) entre as duas grandezas foi de -0.49. Observando ainda a FIGURA 5.7, notou-se que a maior correlação absoluta ocorreu para um atraso de 65 dias. Isso pode indicar o tempo que o pêndulo direto demora a responder a uma variação da temperatura.

Mesmo passando no teste de significância, procurou-se realizar mais um teste simples com estes dados. Como a correlação é negativa entre as medidas avaliadas, ou seja, uma variação inversa ao outro evento, multiplicou-se por -1 o resultado das leituras do pêndulo e foram comparadas as leituras da temperatura atual com a leitura do pêndulo direto de 65 dias depois. A FIGURA 5.8 mostra essa comparação, e de fato o resultado da maior correlação correspondeu com a realidade, principalmente nos últimos cinco anos.

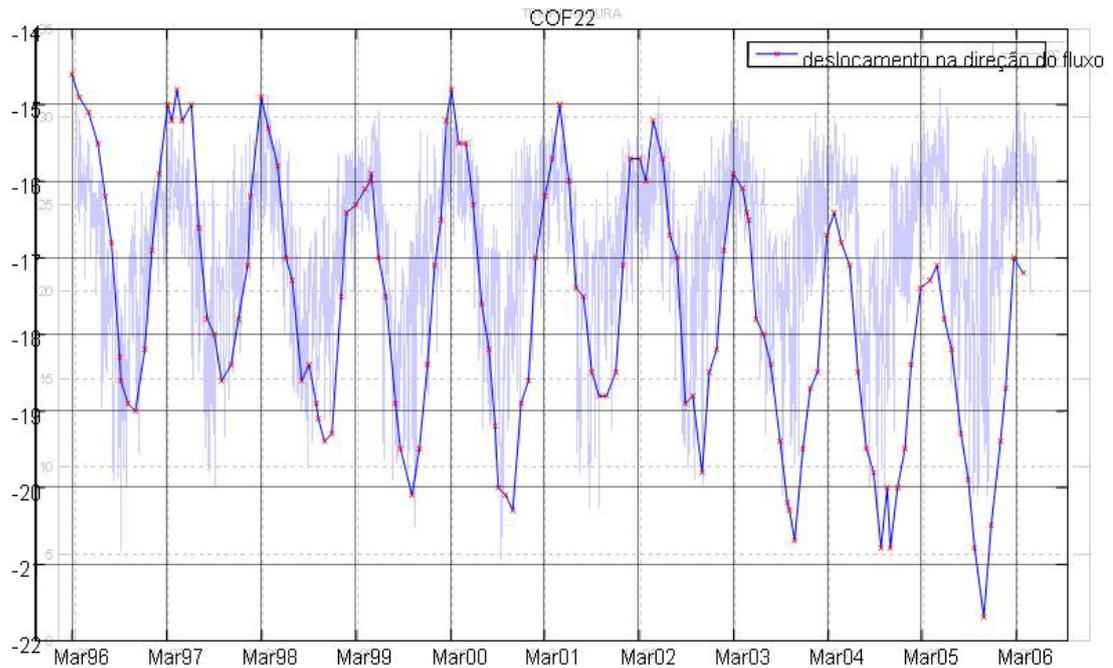


FIGURA 5.8: SÉRIE DE LEITURA DO COORDINÔMETRO COF22 (AZUL DEMARCADO COM VERMELHO) INVERTIDO E AVANÇADO EM 65 DIAS EM RELAÇÃO A TEMPERATURA AMBIENTE (AZUL CLARO)

Contudo, sabe-se que a estrutura de concreto da barragem sofre ação cumulativa do calor do meio ambiente, resultando em dilatação do material e conseqüentemente, descolamentos na estrutura. A instrumentação pode levar algum tempo a responder ao estímulo gerado pelas variações da temperatura, pois deve-se levar em conta o período de ação do calor no concreto. Desta forma, analisou-se a temperatura acumulada na influência na leitura deslocamento na direção do fluxo. Este aspecto é muito importante na previsão de picos de deslocamentos da estrutura. Caso se consiga prever os picos com alguma antecedência, medidas mitigadoras de incidentes ou acidentes podem ser tomados.

A FIGURA 5.9 mostra a correlação para cada período de temperatura acumulado, mostrando que a medição do COF22 sofre maior influência da temperatura acumulada dos últimos 90 dias, e é uma forte influência, pois a correlação está próxima a -0.85 .

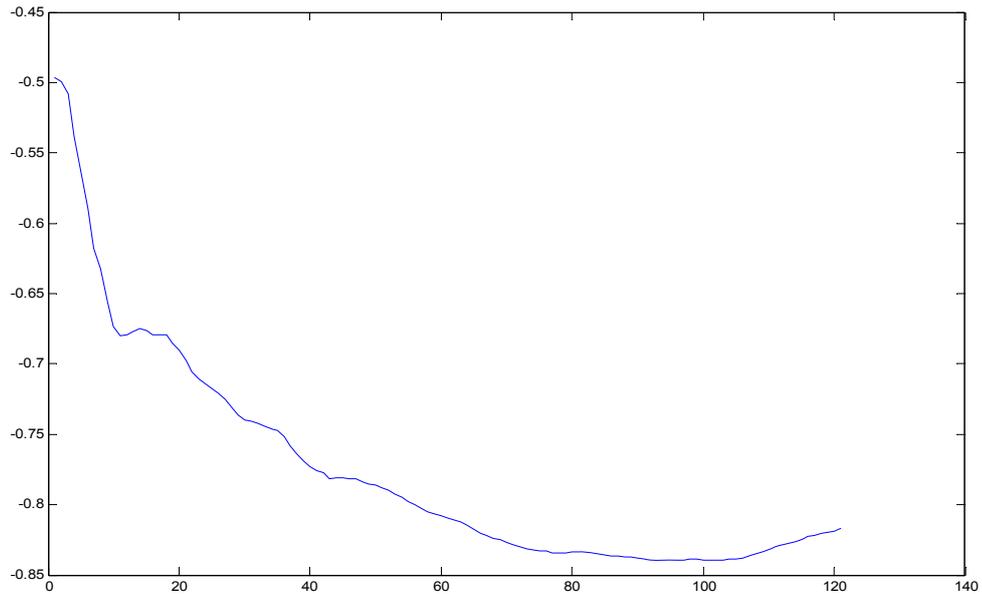


FIGURA 5.9: CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA ACUMULADA DE DIAS ANTERIORES E O COORDINÔMETRO COF22.

Analisou-se então a temperatura *versus* o deslocamento normal ao fluxo (ainda do coordenômetro COF22). A FIGURA 5.10 mostra a série de leituras do deslocamento normal ao fluxo do pêndulo direto COF22 (pontos vermelhos ligados por linha azul escura) e a série de temperatura ambiente, grafada em azul claro.

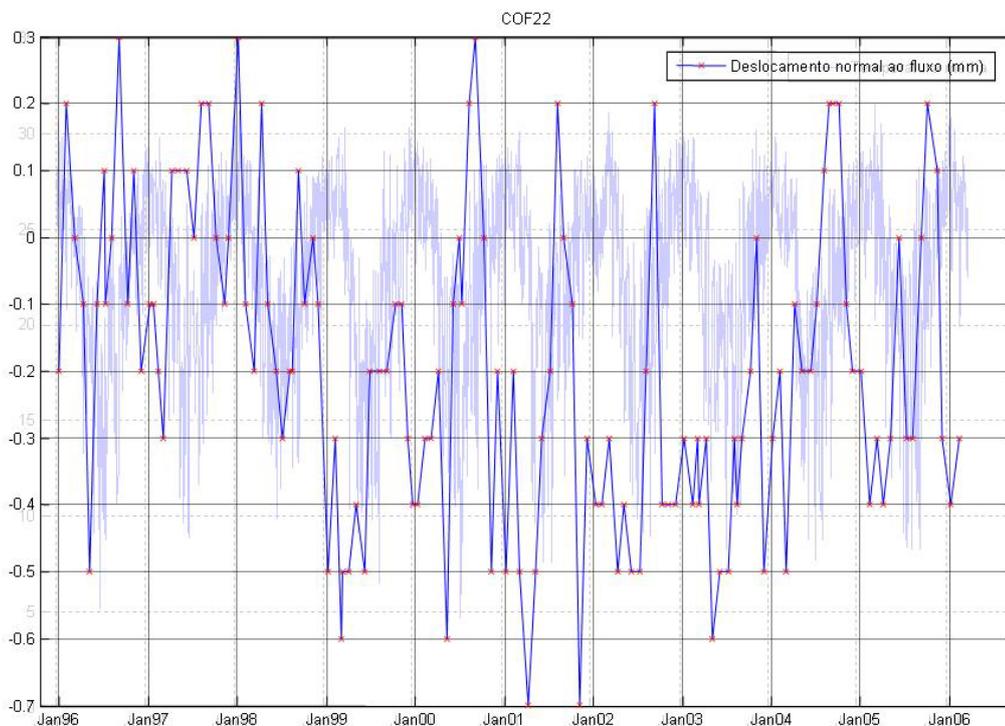


FIGURA 5.10: SÉRIE DE LEITURAS DO COORDINÔMETRO COF22 (AZUL DEMARCADO COM VERMELHO) E A TEMPERATURA AMBIENTE (AZUL CLARO)

A FIGURA 5.11 mostra o valor da correlação entre a temperatura atrasada (até 120 dias) com o deslocamento normal ao fluxo, e apesar de indicar um

atraso de 100 dias, não é viável afirmar isso porque a temperatura ambiente *versus* deslocamento normal ao fluxo mostra baixas correlações, ou seja, a temperatura ambiente não influi ou influi muito pouco sobre o deslocamento normal ao fluxo.

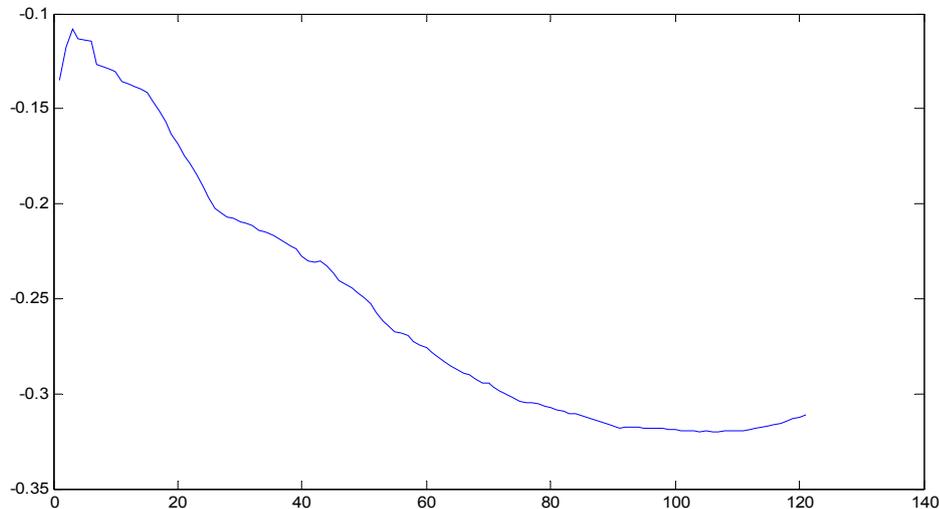


FIGURA 5.11: CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DE DIAS ANTERIORES E O COORDINÔMETRO COF22 - DIREÇÃO NORMAL AO FLUXO

Observando a temperatura acumulada *versus* deslocamento normal ao fluxo, a FIGURA 5.12 indica uma influência da temperatura acumulada dos últimos 115 dias no COF22, mas a correlação não passa de -0.5, um pouco baixa para se tirar conclusões.

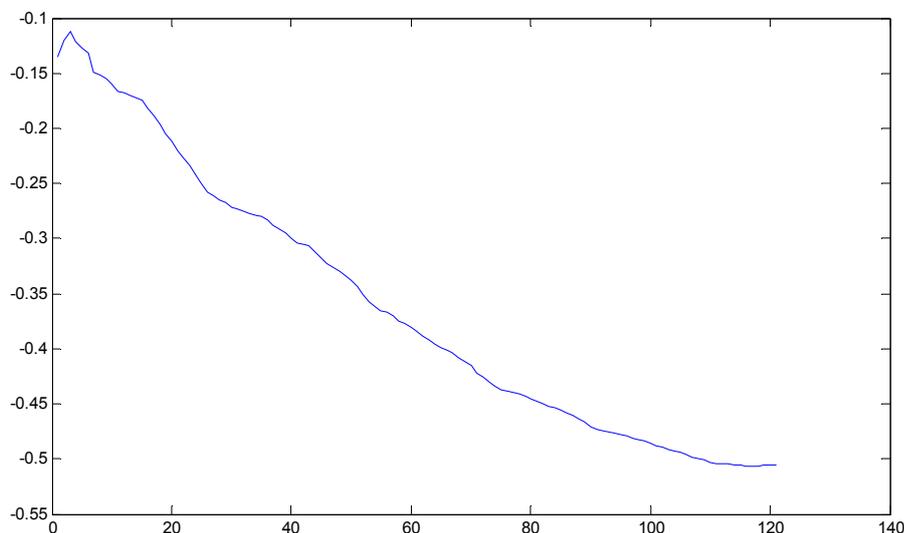


FIGURA 5.12: CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA ACUMULADA DE DIAS ANTERIORES E O COORDINÔMETRO COF22 - DIREÇÃO NORMAL AO FLUXO

b) Tensômetro simples

Observando-se a FIGURA 5.13, nota-se que os picos de temperatura estão praticamente alinhados com os picos de tensão. Isto indica uma possível correlação positiva.

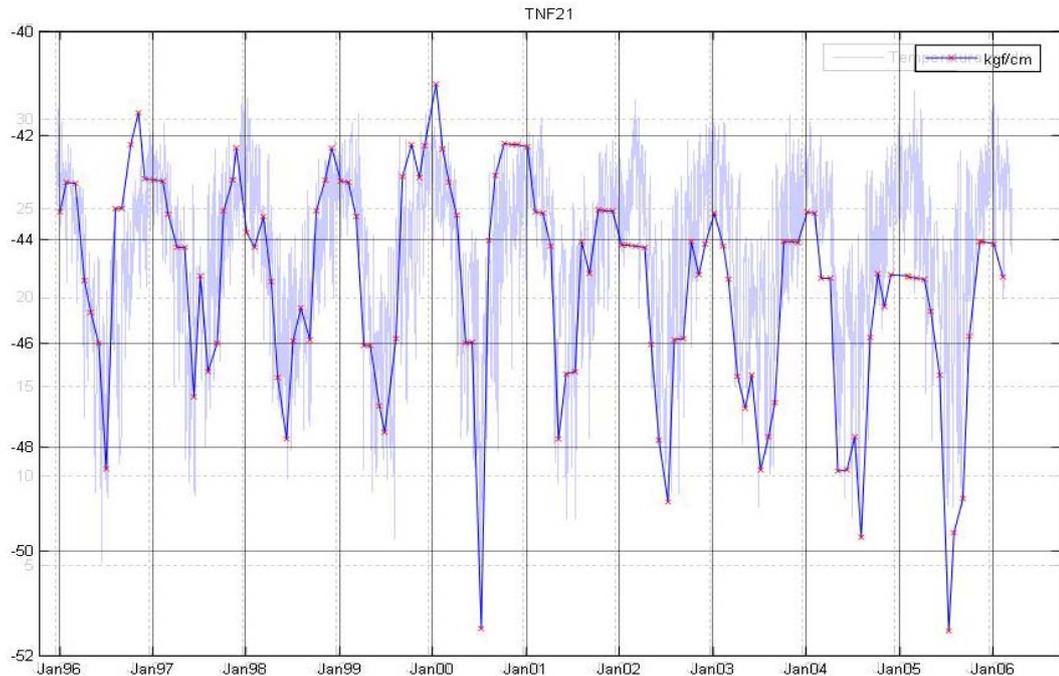


FIGURA 5.13: SÉRIE DE LEITURAS DO TENSÔMETRO SIMPLES TNF21 (AZUL DEMARCADO COM VERMELHO) E A TEMPERATURA AMBIENTE (AZUL DESBOTADO)

Na FIGURA 5.14, pode-se notar que a correlação direta entre as duas grandezas (em datas iguais) foi de 0.59. Porém, analisando para qual atraso resultou maior correlação, através da mesma FIGURA 5.14, ficou indicado um atraso de 10 dias, porém com uma correlação de 0.64. Esta pode ser considerada uma diferença muito pequena em relação à correlação direta, mas os resultados com os outros tensômetros do bloco apontaram para atrasos entre 9 a 12 dias, dando a entender que tal resultado tem significado.

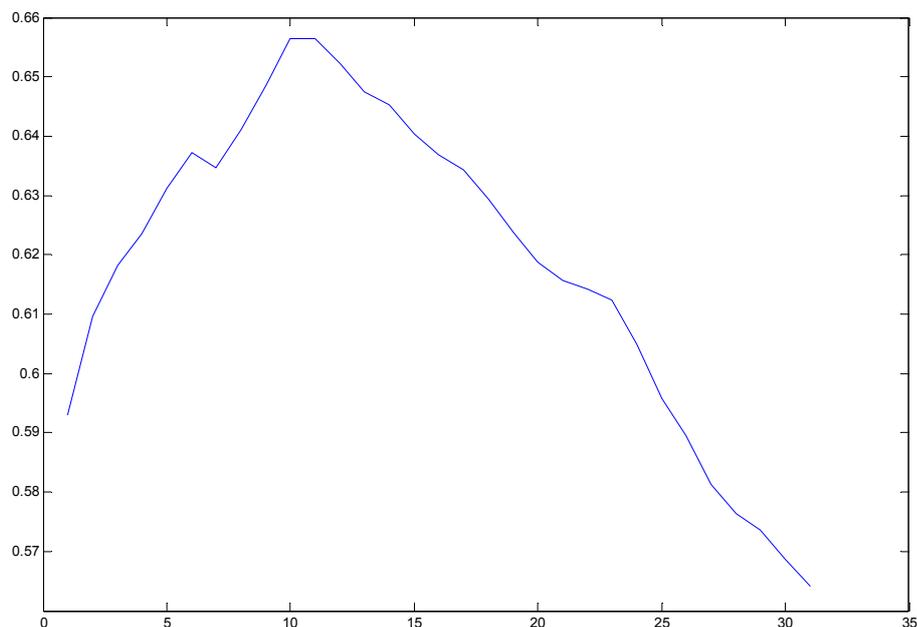


FIGURA 5.14: CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DE DIAS ANTERIORES E O TENSÔMETRO SIMPLES

Verificando-se a correlação da temperatura acumulada com a medida atual do tensômetro, obteve-se uma correlação máxima de 0.8 para 11 dias, permitindo quantificar aí o período de acúmulo de temperatura a ser considerado, ou seja, a medição do instrumento TNF21 (tensão) sofre maior influência dos últimos 11 dias de temperaturas acumuladas. Este resultado pode ser observado na FIGURA 5.15.

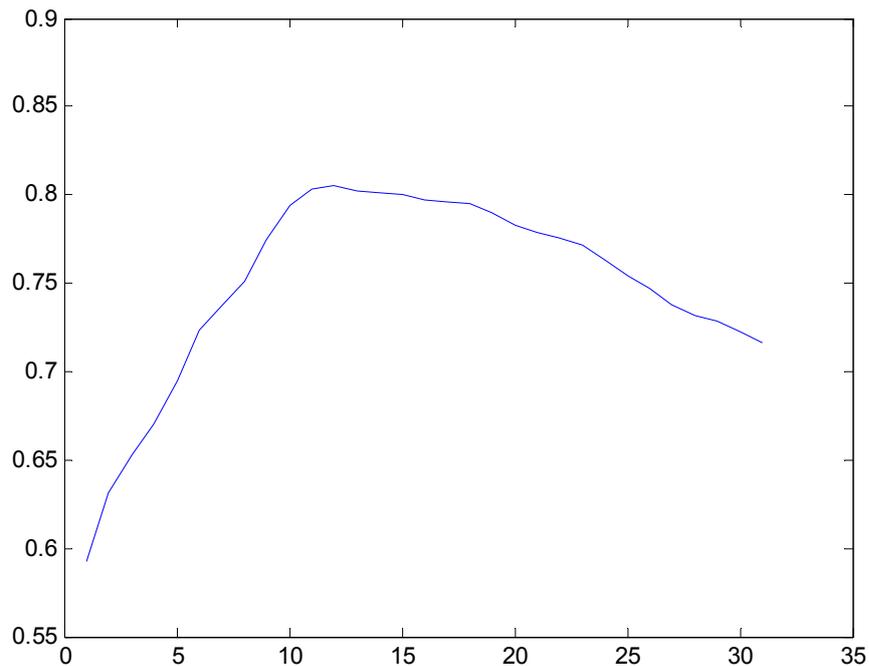


FIGURA 5.15: CORRELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA ACUMULADA DE DIAS ANTERIORES E O TENSÔMETRO SIMPLES

c) Rosetas de Tensômetro

Esse instrumento mede a tensão e a temperatura em três direções. Aqui se mostra a análise de correlação da tensão na direção 3 obtida do instrumento RTF26 com a temperatura atual, atrasada e acumulada.

A correlação direta entre as duas grandezas foi de 0.65 e a correlação da temperatura de dias anteriores foi maior para um atraso de 7 dias, como pode ser observado na FIGURA 5.16.

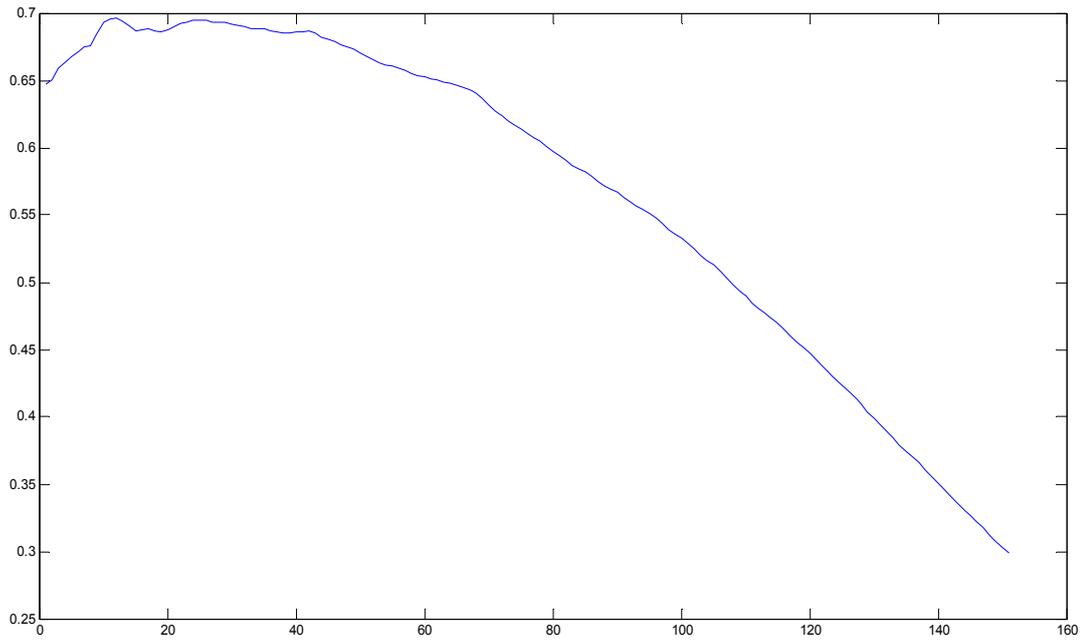


FIGURA 5.16: CORRELAÇÕES ENTRE A TENSÃO DO RTF26(3) E A TEMPERATURA DE DIAS ANTERIORES

Verificando qual é a influência da temperatura acumulada de dias anteriores na medida do RTF26, as correlações indicaram a correlação máxima para 40 dias (FIGURA 5.17), o que indica que tal instrumento sofre influência da temperatura ambiente de até 40 dias anteriores.

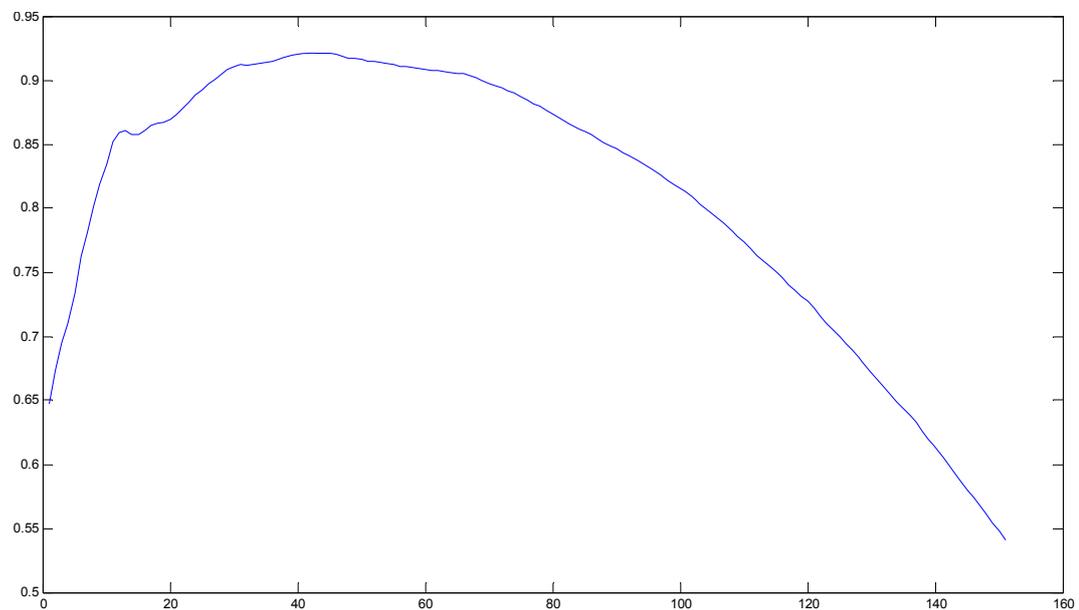


FIGURA 5.17: CORRELAÇÕES ENTRE A TENSÃO DO RTF26(3) E A TEMPERATURA ACUMULADA DE DIAS ANTERIORES

5.3.2 Correlação entre nível da água a montante e jusante e leituras dos instrumentos

Há duas informações disponíveis quanto ao nível da água próximo à barragem: o nível de montante e jusante. Verificaram-se as possíveis influências desses níveis em todos os instrumentos.

Mas obtiveram-se poucas correlações significativamente diferentes de zero, mesmo assim consideradas fracas, abaixo de 0.5, que foram com a maioria dos piezômetros e dois extensômetros.

Assim, verificou-se a influência do nível da água dos dias anteriores nesses dois tipos de instrumentos. E diferente do caso da temperatura, as correlações não indicaram que os níveis passados do nível da água influem no resultado da leitura nos instrumentos. Tentando buscar uma explicação que justifique isso, a mais coerente seria o fato do nível da água, com exceção do ano de 2000, ser muito estável na barragem, com uma baixíssima variabilidade. Se houver a variação na leitura dos instrumentos, não seria por causa de algo que praticamente não varia. As séries históricas dos níveis de água a montante e jusante podem ser observadas nas FIGURA 5.18 e 5.19, respectivamente.

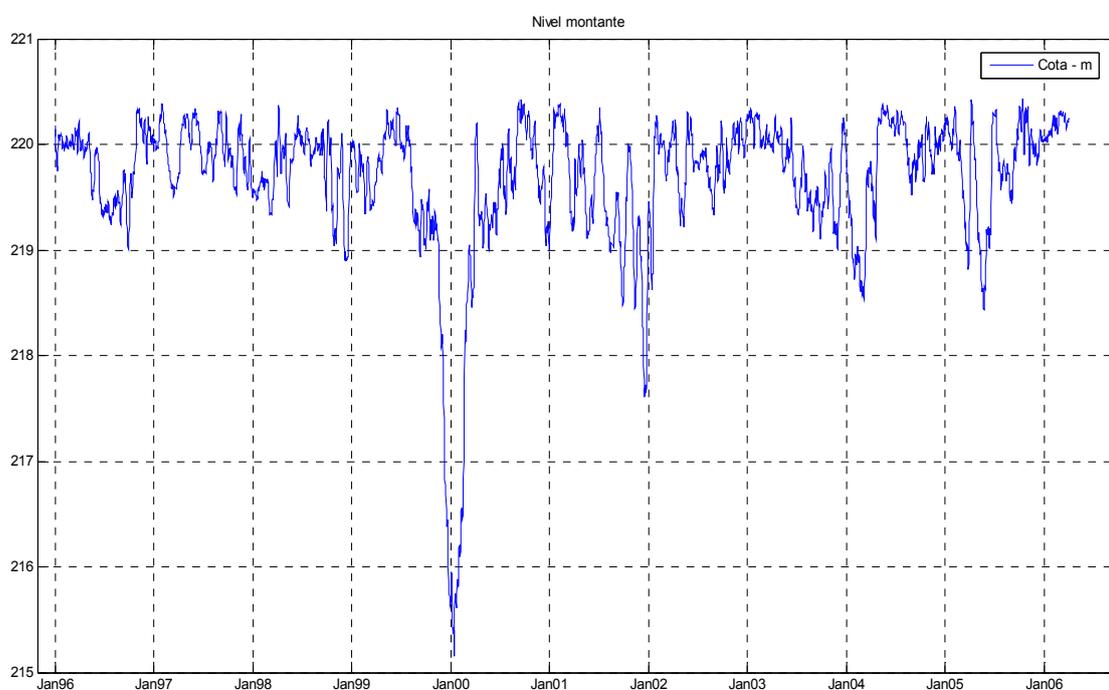


FIGURA 5.18: COTA DO NÍVEL DA ÁGUA A MONTANTE

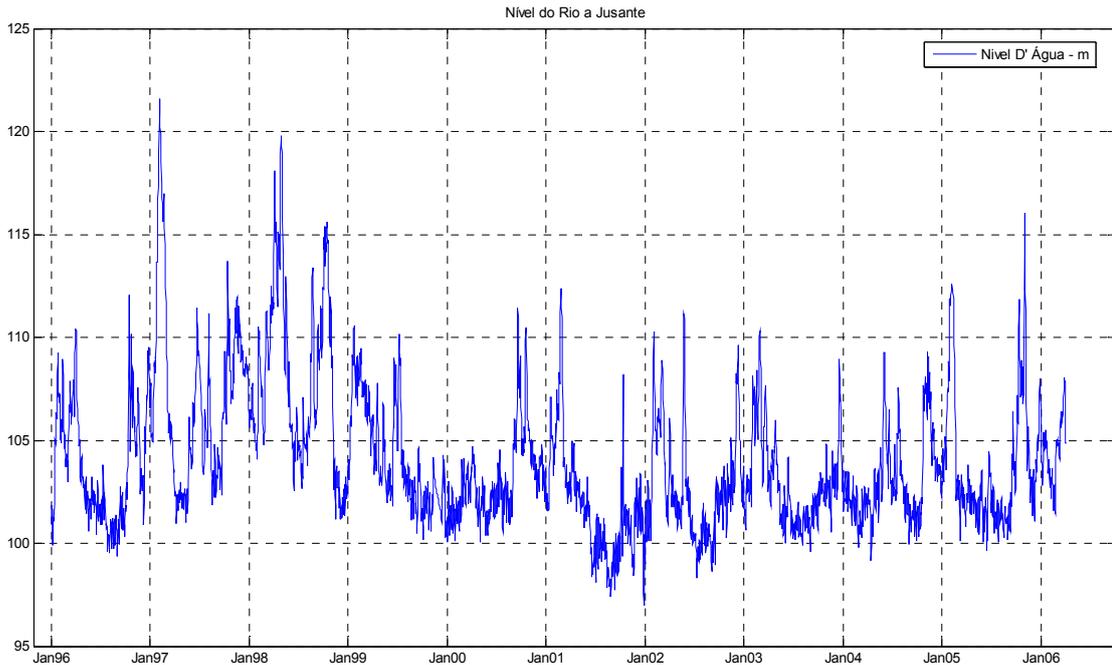


FIGURA 5.19: COTA DO NÍVEL DA ÁGUA A JUSANTE

Apresenta-se a seguir o exemplo de uma das análises efetuadas, que foi com o piezômetro PSF72 e o nível água jusante acumulado dos dias anteriores. A Figura 5.19 mostra a correlação das medidas do piezômetro PSF72 e o NA a jusante para cada intervalo de dias anteriores acumulados. E pelo que se viu, ela indica uma correlação máxima para um intervalo acumulado de 10 dias, porém, com uma correlação insignificativamente diferente da correlação direta. Este fato não permite concluir a hipótese que os últimos 10 dias do nível da água influem na leitura do piezômetro PSF72.

Foi exposta justamente a análise com esse instrumento pelo fato de ser o único com alguma correlação com o nível da água (ANEXO 11).

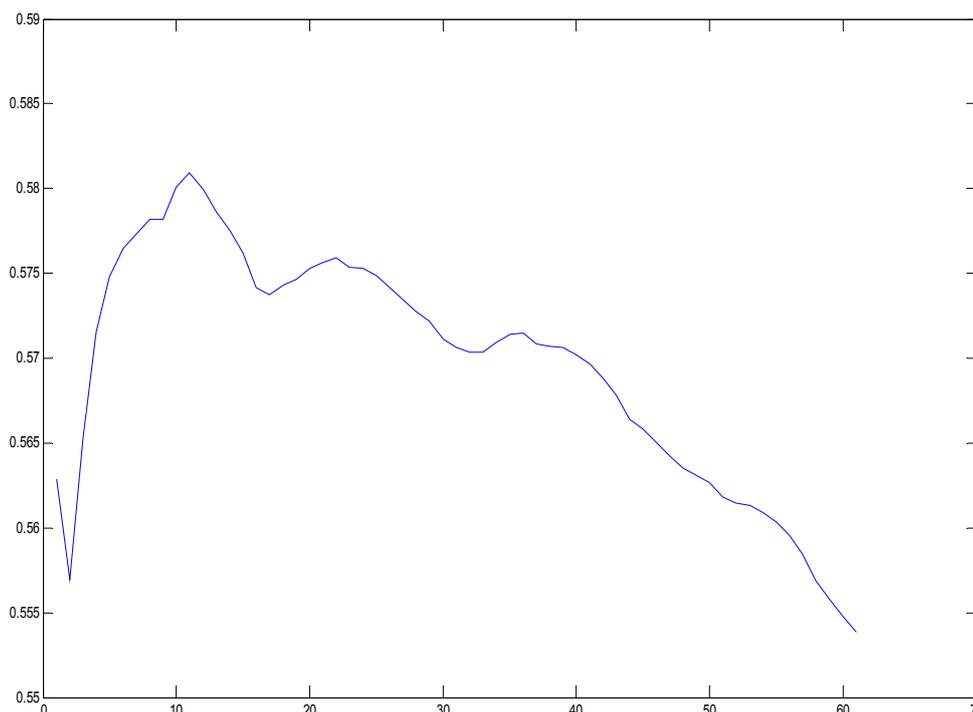


FIGURA 5.20: CORRELAÇÕES ENTE NÍVEL DA ÁGUA A JUSANTE ACUMULADO DE DIAS ANTERIORES COM O PSF72.

5.3.3 Correlações entre instrumentos de tipos diferentes

Foram analisadas as possíveis influências entre os diversos tipos de instrumentos presentes nos blocos F 19/20. Como a quantidade de instrumentos é muito grande, ficam aqui expostas as interpretações dos resultados considerados mais interessantes. Porém, a matriz de correlação entre os instrumentos, tanto os discutidos ou não, estão em anexo nesse trabalho (ANEXO 11).

Com exceção das bases de alongômetros e alguns medidores elétricos de juntas, com um dia de tolerância conseguiu-se agrupar todos os demais instrumentos, inclusive os dados de temperatura ambiente e nível da água. O fato de não se conseguirem abordar as bases de alongômetros e alguns medidores de juntas é que suas leituras não ocorreram em datas próximas às demais, impossibilitando uma análise global incluindo-os.

O fato de se utilizar leituras realizadas com até um dia de diferença foi baseada em testes realizados com os instrumentos de mesmo tipo, onde se verificava a diferença nas correlações baseadas em leituras ocorridas no mesmo dia, com as correlações baseada em leituras ocorridas em até três dias de diferença. Caso as correlações não mudassem, indicava que a tolerância não mudava a suposta relação existente entre os instrumentos. No caso da base de alongômetro

no piso, que é único no bloco F 19/20, teve-se que verificar se sua correlação variava em relação as bases de alongamento na parede,

O primeiro instrumento a ser comentado é o coordenômetro COF22 em relação ao outros instrumentos.

A partir da matriz de correlação (ANEXO 11), verificou-se que o COF22 está altamente correlacionado com o instrumento roseta de tensômetro RTF24, na ordem de -0.92. A matriz de correlação indica que este instrumento tem uma correlação mediana com a temperatura ambiente. Porém, analisando a correlação acumulada da temperatura sobre o RTF24, a mesma resulta em 0.90 para um acumulo de 70 dias, muito parecido com o caso do pêndulo direto, que apontou a correlação máxima para um acumulo de 65 dias de temperaturas. O que se imagina então é que a temperatura ao longo de aproximadamente 70 dias provoca dilatações no concreto aumentando o valor das leituras das tensões desse instrumento, que por sua vez imediatamente provoca o deslocamento da direção oposta ao fluxo da água.

Essa roseta de tensômetro está a jusante da barragem, próxima a RTF25. Este instrumento também é altamente correlacionado com o pêndulo, diferente do RTF21, que está na parte baixa a montante do bloco e que não sofre incidência de radiação tão fortemente. Certamente sua correlação com a temperatura ficou baixa (ANEXO 11). O RTF22 também está a montante da barragem, porém na parte alta do bloco, o que o faz sofrer um pouco da influência da temperatura, concluindo que o bloco sofre mais tensões devido à variação da temperatura na parte alta a jusante.

Outro instrumento com uma relação moderada com o pêndulo são os piezômetros PSF72 e PSF75, ambos praticamente na mesma cota (vide FIGURA 5.21). Esta correlação está em torno de -0.7, o que indica que, se aumentar a subpressão, o pêndulo estará registrando um deslocamento na direção contrária ao fluxo da água ou vice-versa.

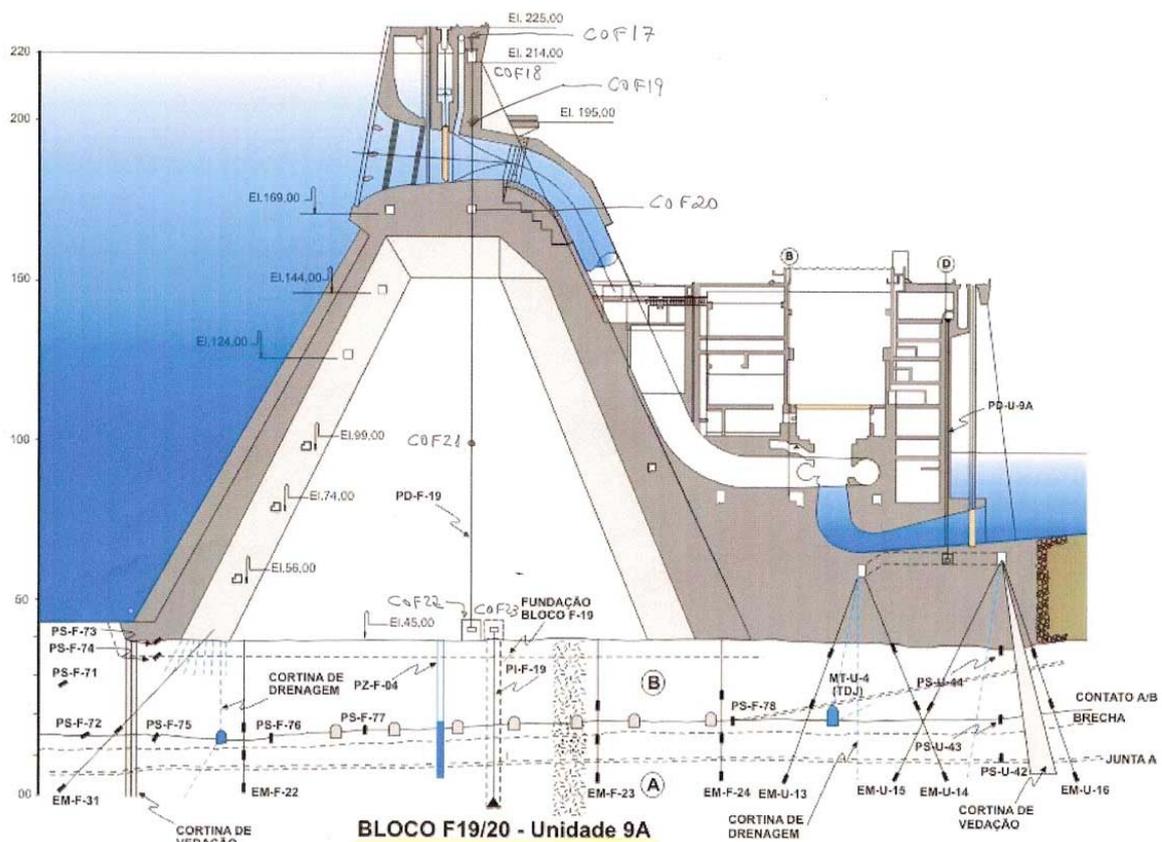


FIGURA 5.21: CORTE LATERAL DO BLOCO F 19/20 (FONTE: ITAIPU)

De todos os medidores elétricos de juntas, o JIF17 se mostrou mais fortemente correlacionado com o deslocamento na direção do fluxo medida pelo coordenômetro COF22.

Uma outra relação que as análises obtiveram foi a entre a temperatura registrada pelo tensômetro simples TNF21 com os termômetros dos medidores elétricos de junta JIF10, JIF15, JIF17, JIF21, JIF22, todos esse com uma relação praticamente perfeita, pois a correlação entre suas leituras são acima de 0,97, ou seja, se a temperatura registrada pelo termômetros dos medidores elétricos de juntas, a leitura da temperatura obtida pelo tensômetro TNF21 aumentará, provavelmente isso acontece pelo fato desses instrumentos estarem próximos entre si, esse resultado serve também para concluir que esses termômetros estão funcionando corretamente. O único que se comportou de maneira diferente foi o instrumento JIF10, mas recentemente soubemos que ele está estragado.

Um mapa detalhando a correlação entre todas as leituras de todos os instrumentos e entre a temperatura e o nível da água estão no anexo 11. Que foi baseada numa amostra de 66 leituras que ocorreram com até um dia de diferença entre si (limite que os testes estatísticos permitiram). Não foi possível incluir as

bases de alongâmetro nesse tipo de análise, pois essas leituras ocorriam em dias mais distantes que o permitido, e os medidores elétricos de juntas pelo fato de elas possuírem poucas leituras (frequências trimestrais).

Algumas aplicações secundárias a esses resultados são as seguintes:

Supondo que se percam algumas leituras do coordenômetro COF22 e que seja necessário recuperá-las, verificando a matriz de correlação do anexo 11, nota-se que os instrumentos mais correlacionados a ele são os RTF24_4_TENSÃO, RTF24_4_TENSÃO, RTF26_3_TENSÃO, TSF15 e TNF23. Onde a partir de uma regressão múltipla, ajusta-se um modelo linear a resposta da regressão múltipla do pêndulo direto COF22 a partir desses outros instrumentos mais correlacionados, a expressão do pêndulo direto da medida deslocamento normal ao fluxo segue adiante. O modelo ajustado por $Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5$, onde Y_i é a variável dependente e X_1 , X_2 , X_3 , X_4 e X_5 são as variáveis independentes em que:

- Y_i representa o leitura do deslocamento na direção do fluxo obtida pelo coordenômetro COF22 do pêndulo PDF19;
- X_1 , X_2 e X_3 são leituras de tensões obtidas pelas rosetas de tensômetros RTF24_3, RTF25_3 e RTF26_3 respectivamente;
- X_4 representa o tensômetro simples TNF23;
- X_5 é o termômetro de superfície TSF15.

O modelo aplicado gerou a expressão 5.1:

5.1

$$\text{COF22_D} = 8,54617 - 0,322631*\text{RTF24_3_TEN} - 0,217368*\text{RTF25_3_TEN} - 0,15721*\text{RTF26_3_TEN} - 0,608032*\text{TNF23_TEN} + 0,271886*\text{TSF15}$$

Abaixo segue uma tabela que informa a data e as leituras obtidas dos instrumentos e o valor recuperado do COF22 a partir desses instrumentos mediante o emprego da expressão a 5.1, o valor que realmente foi medido pelo COF22, e o erro percentual, dado pela expressão 5.2.

$$\text{Erro percentual} = |(\text{valor previsto} - \text{valor real}) / \text{valor real}| * 100$$

5.2

TABELA 5.1: RECUPERAÇÃO DE CINCO LEITURAS DO COF22 A PARTIR DAS LEITURAS DE OUTROS INSTRUMENTOS.

	RTF24_3	RTF25_3	RTF26_3	TSF15	TNF23	Valor recuperado do COF22	Valor real do COF22	Erro %
17/2/2004	-22,13	-15,51	-15,48	26,49	20,04	16,51	16,4	0,670732
18/5/2004	-25,40	-16,97	-25,59	22,22	20,67	17,93	18,5	3,081081
20/9/2004	-26,77	-19,05	-30,99	19,02	17,78	20,56	20,8	1,153846
17/1/2005	-23,56	-15,12	-16,43	24,47	19,20	16,99	17,4	2,356322
17/10/2005	-26,76	-19,40	-29,68	19,59	17,49	20,75	20,5	2,356322

A estatística R^2 indica que o modelo criado explica 94.34% da variabilidade das leituras do COF22_2. A estatística R^2 ajustado, que é mais apropriado para comparar modelos com os números diferentes de variáveis independentes, é 94.06%. A FIGURA 5.22 mostra uma relação entre o valor predito pelo modelo e o observado. O erro padrão da estimativa que indica o desvio padrão dos resíduos é 0.40, o erro absoluto médio é 0.30. Outra aplicação a esse método seria criar um sistema que comparasse o valor real e o estimado a partir de outros instrumentos, e caso sejam muito diferentes, daria a conclusão que a leitura está equivocada ou o modelo matemático que a relaciona está incorreto. Tais análises são mais precisas entre instrumentos altamente correlacionados, o que ocorre na sua maioria entre instrumentos de mesmo tipo.

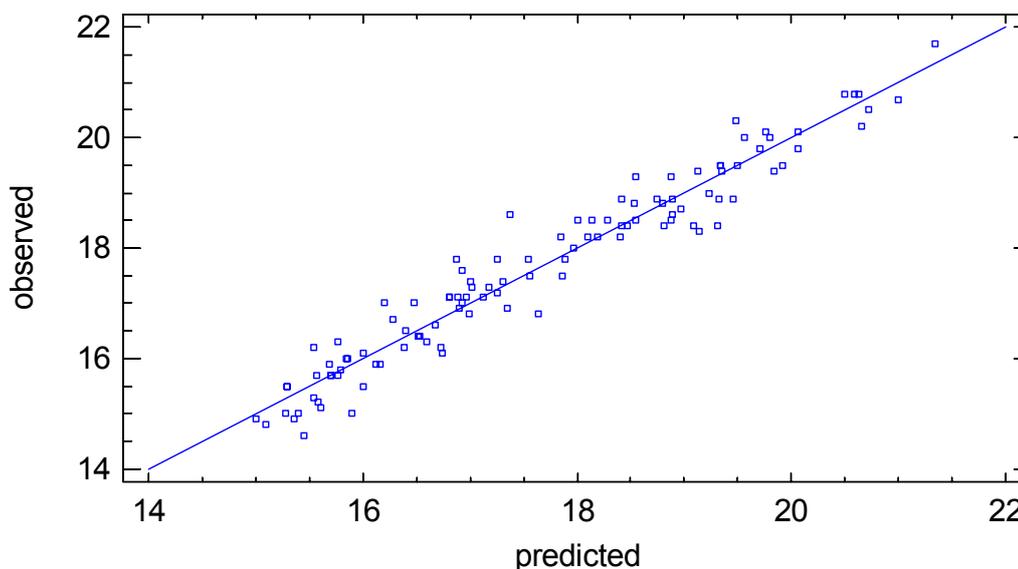


FIGURA 5.22: VALOR PREDITO PELO MODELO X OBSERVADO

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusões

Barragens, em especial as de grande porte, costumam apresentar uma grande quantidade de instrumentos de auscultação. Nestas obras, o monitoramento hidráulico e mecânico através da instalação de um sistema de instrumentação desempenha um papel fundamental na avaliação do comportamento destas estruturas, tanto durante o período de construção quanto no período de operação. O programa de monitoramento das barragens é composto geralmente por uma série de instrumentos que fornecem o conhecimento adequado da operação da obra.

Neste trabalho, se propôs um método de verificar as possíveis interações existentes entre as leituras da instrumentação de uma barragem de concreto, utilizando como caso de estudo a barragem de ITAIPU, a partir das informações obtidas do seu sistema de instrumentação, dando especial atenção aos mais significativos à sua segurança.

Antes de se iniciarem tais análises, houve um intenso trabalho de organização dos dados, onde se criaram rotinas computacionais que facilitaram a obtenção e manipulação dos dados que eram necessários às análises. Tais rotinas poderão ser úteis em outros trabalhos que necessitem desses dados sob determinadas condições específicas, necessárias à execução dos mesmos.

Para isso, utilizou-se o coeficiente de correlação de PEARSON, uma ferramenta estatística simples, eficaz e que gera resultados de fácil interpretação.

Testes estatísticos referentes ao coeficiente de correlação foram feitos para verificar a confiabilidade dos resultados, além de dar meios para decidir sobre permissibilidade de comparar leituras ocorridas com até um dia de diferença como se fossem ocorridas no mesmo dia, o que foi fundamental para viabilizar o cálculo de correlações entre instrumentos de tipos diferentes.

A partir do cálculo de correlação entre as diversas séries históricas dos instrumentos que compõe o sistema de instrumentação de ITAIPU e o histórico das medidas ambientais como a temperatura ambiente e nível da água a montante e jusante, verificou-se a possível influência direta entre cada um destes instrumentos,

tanto os instrumentos do mesmo tipo quanto os diferentes, além da influência da temperatura e nível da água nas leituras desses instrumentos.

Quanto às influências da temperatura e nível da água no resultado das leituras dos instrumentos, foram abordados três aspectos: a temperatura atual com leitura atual de um instrumento, temperatura de dias anteriores com uma leitura atual e a temperatura acumulada anteriores ao dia de uma leitura.

Como o número de instrumentos e de leituras no caso de Itaipu era elevado, outras rotinas intensivas calcularam sucessivas correlações, que automaticamente apontaram as correlações mais interessantes. Isto foi útil na avaliação da influência da temperatura atrasada e acumulada na leitura dos instrumentos.

Isto permitiu que se estimasse o período que os instrumentos demoram a responder a essas variações de temperatura e nível da água do reservatório. Este resultado é muito importante na previsão de picos de deslocamentos da estrutura, que podem gerar situações de emergência na mesma. Caso se consiga prever os picos com alguma antecedência, medidas mitigadoras de incidentes ou acidentes podem ser tomadas, implicando num aumento da segurança da barragem.

Verificou-se que a temperatura influi na leitura da maioria dos instrumentos, e que alguns deles, dependendo de sua posição referente ao bloco e conseqüentemente ao regime de insolação, demoram mais ou menos tempo para reagir a essas variações.

Com isso, foi obtido um panorama geral das interações entre as leituras dos instrumentos do bloco principal da barragem, e a influência da temperatura ambiente na leitura desses instrumentos.

Outro resultado interessante foi o fato de que alguns instrumentos de mesmo tipo são altamente correlacionados, o que pode ser usado como critério de decisão no aumento no intervalo entre essas leituras, podendo gerar uma economia de tempo e dinheiro para a empresa, sem o descuido com a segurança da estrutura.

A reconstrução de leituras perdidas de um determinado instrumento pode ser recuperada a partir de uma regressão simples ou múltipla, usando as leituras de outros instrumentos altamente correlacionados a esse.

A partir do modelo de comportamento padrão baseado nas correlações entre os instrumentos, um novo cálculo de correlação com novos dados históricos que vão surgindo podem ser usados como critério na detecção de comportamentos

anômalos ou instrumentos falhos, simplesmente verificando se ocorre uma variação brusca nessas correlações, o que indicaria uma mudança no padrão de interação entre as leituras dos instrumentos, e a causa disso certamente deve ser investigada.

6.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros na linha de pesquisa em segurança de barragens seguem abaixo:

- Uma maior investigação buscando explicações sobre os motivos que levam os instrumentos analisados obterem alta ou baixa correlação;
- Realizar uma análise de correlação não-linear entre os instrumentos;
- Gerar relações matemáticas entre as leituras dos instrumentos correlacionados utilizando regressão múltipla;
- Utilizar os resultados desse trabalho como critério de escolha de variáveis de entrada para rede neural de previsão das séries temporais dos instrumentos.
- Geração de critérios de alarme relacionados à segurança de barragens baseados na variação dos valores do mapa de correlação entre instrumentos e entre instrumentos e variáveis ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIEVC. **Análise de Incertezas e Estimação de Valores de Controle Para o Sistema de Monitoração Geotécnico-Estrutural na Barragem de Itaipu.** FINEP – CT-HIDRO – Segurança de Barragens, 2005.

AHMADI, HASSAN – **Input determination in measuring instruments for dams.** Anais...In: International Congress on Large Dams, 15, vol 1, 1985, Lousanne, France, p. 353-363.

ALMEIDA, Antônio B. de. **Vulnerabilidade de Risco de Ruptura de Barragens.** Acessado em 05 de dezembro de 2006. Disponível em http://www.dha.Inec.pt/nti/english/studies/FLOOD_RISK/textos/pdf/ActasJT/Betamio_Almeida.pdf

BARROS, F. Paes; COLMAN, J. L.; GALLICO, A., et al. **Itaipu project: The structural safety assessment through physical models.** In: International Congress on Large Dams, 14, vol 1, 1982, Rio de Janeiro, Brazil, p. 117-142.

BUDWEG, Ferdinand M. G. – **Safety improvements taught by dam incidents and accidents in Brazil.** . In: International Congress on Large Dams, 14, vol 1, 1982, Rio de Janeiro, Brazil, p. 1245-1262.

CARDIA, Rubens. **Notas de Aula – Curso de Segurança de Barragens – CSEB.** Bauru, São Paulo, 2004.

CBDB. **Comitê Brasileiro de Barragens.** Disponível em <http://www.cbdb.org.br/>. Acessado em 08 de dezembro de 2006.

CBGB. **Diretrizes para a Inspeção e Avaliação de Segurança de Barragens em Operação.** Rio de Janeiro, 1983.

CELERI, ALOISIO **Monitoring instrumentation and safety dams.** River and Dam Engeneering, 2, 1995, Brazil.

CEPEDA, L.; VIZUETE, O. ; SHARMA **Instrumentation of Daniel Palacios dam during construction and first filling.** Anais...In: International Congress on Large Dams, 15, vol 1, 1985, Lousanne, France, p. 881-901.

CESP-COMPANHIA ENERGETICA DO ESTADO DE SÃO PAULO **Diretrizes para inspeção e avaliação de segurança de barragens em operação.** São Paulo, 1980.

CHARLES, J. A.; TEDD, P.; WRIGHT, C. E. **Safety assessment and legislation for reservoirs in Great Britain.** Anais...In: International Congress on Large Dams, 18, vol 1, 1994, Durban, South Africa, p. 1223-1235.

CHOQUET, Pierre; JUNEAU, François; BESSETTE, John **New generatino of Fabry-Perot fiber optic sensors for monitoring of structures**. Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 7, 2000, California, USA.

COGERH. **Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (Ceará)**. Disponível em <http://www.cogerh.com.br/>. Acessado em 09 de dezembro de 2006.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. 17 ed. São Paulo: E. Blücher, 1977.

COTRIM, J. R.; KRAUCH, H. W.; SZPILMAN, A. et al. **Instrumentation for evaluating the performance of Itaipu structures and foundations**. Anais...In: International Congress on Large Dams, 14, vol 1,1982, Rio de Janeiro, Brazil, p. 1195-1217

CRUZ, Paulo T. **100 Barragens Brasileiras**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

DIBIAGIO, Elmo. Question **78 - Monitoring of Dams and Their Foundations – General Report**. Twentieth Congress on Large Dams, ICOLD, Pequim: 2000.

DUARTE, Joaquim M. G.; CALCINA, A. M.; GALVÁN, V. R. **Instrumentação Geotécnica de Obras Hidrelétricas Brasileiras: Alguns Casos Práticos Atuais**. Anais do COBRAMSEG 2006, Curitiba, Brasil, 2006.

DUNNICLIFF, John. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**.Canada: Wiley, 1998.

ELETRONORTE, **Centrais Elétricas do Norte do Brasil**, disponível em <http://www.eln.gov.br/> , 2006

FIGUEIREDO, Nelson N.; MENESCAL, R. A.; FONTENELLE, A. S.; VIEIRA, V. P. P. B. **Dam Safety Program in Ceará State in Brazil**. Anais do International Congress On Conservation And Rehabilitation On Dams, Madrid, Espanha, 2002.

FONTELLE, Alexandre de S.; MENESCAL, R. A.; VIEIRA, V. P. P. B; OLIVEIRA, S. K. F. **Ações de Segurança de Barragens do Estado do Ceará com Ênfase em Inspeções e Risco**. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais, Fortaleza – CE, 2001.

FIORINI, A. S. **Ademar Sérgio Fiorini. Comunicação Pessoal**. Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2006.

GAISBAUER, R. **Uncertainty In Safety Evaluation Of Concrete Dams Nw-lalad - Preliminary Findings (Eu-Network -Integrity Assessment Of Large Concrete Dams)**. Proc. Of 73rd Annual Meeting of ICOLD, Teerã, Irã, 2005.

GUTIÉRREZ, João L. C. **Monitoramento da Instrumentação da Barragem de Corumbá-I por Redes Neurais e Modelos de Box & Jenkins**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2003.

ICOLD. **International Commission on Large Dams**. Disponível em <http://www.icold-cigb.net>. Acessado em 08 de dezembro de 2006.

IIDA, R.; HOJO, K; **Safety monitoring of dams during first filling of reservoirs.** Anais...In: International Congress on Large Dams, 13, vol 1,1979, New Delhi, India, p. 385-406.

ITAIPU. **Itaipu Binacional.** Disponível em <http://www.itaipu.gov.br>. Acessado em 09 de dezembro de 2006.

JOHNSON, R. A. E WICHERN, D. W. (1982). **Applied Multivariate Statistical Analysis.** Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

MATOS, SILVIA F. **Durabilidade de Instrumentos para Auscultação de Barragem de Concreto. Estudo de Caso: Extensômetros e Tensômetros para Concreto na Barragem de Itaipu.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Curitiba, 2002.

MATOS, SILVIA F.; MESCOLIN, H. C.; RIBEIRO, A. **Automação da Instrumentação de Fundação de Itaipu.** Anais do COBRAMSEG 2006, Curitiba, Brasil.

MENESCAL, Rogério de A.; OLIVEIRA, S. K. F.; FONTELLE, A. S.; VIEIRA, V. P. P. **B. Acidentes e Incidentes em Barragens no Estado do Ceará.** XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Fortaleza- CE, 2001.

MILES M. B.; HUBERMAN A.M. **Qualitative data analysis.** Thousand Oaks, California: Sage Publicatons; 1994.

OSAKO, Cláudio I. **A manutenção dos drenos de fundações de barragens de concreto. O caso da Usina Hidrelétrica de Itaipu.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Construção Civil, UFPR, 2002.

OSAKO, C. I. **Claudio Issamy Osako. Comunicação Pessoal.** Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2006.

PERROCA, Marcia G. P.; GAIDZINSKI, R. R. **Análise da validação de constructo do instrumento de classificação de pacientes proposto por Perroca.** Rev. Latino-Am. Enfermagem vol.12 nº1, Ribeirão Preto, 2004.

PMBOK. **Project Management Body of Knowledge.** Belo Horizonte: PMI, 2000.

PORTO, E. C. **Evangelista Caetano Porto. Comunicação Pessoal.** Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2006.

PORTO, Evangelista C. **Critério Para Determinação de Vazões Pela Fundação de Barragens com Base nos Ensaios de Perda D'água. O Caso da Usina Hidrelétrica de Itaipu.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Construção Civil, UFPR, 2002.

RAMOS, CARLOS M.; MELO, J. F. **Segurança de Barragens. Aspectos Hidráulicos e Operacionais.** Acessado em 25/10/2006, disponível em <http://www.dha.Inec.pt/nre/portugues/funcionarios/papers/ramos/seguranca%20barragens%20aspectos%20hidraulicos%20operacionais.pdf>.

RIF. **Relatório de Instrumentação de Fundação – Setembro de 2005**. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2005.

RIC. **Relatório de Instrumentação de Concreto – Março de 2005**. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2005.

ROBSON, COLIN. **Real World Research - A Resource for Social Scientists and Practitioner**. 2. ed. Londres: Blackwell, 2002.

RSB. Regulamento de Segurança de Barragens (Decreto-Lei nº11/90). **Acessado em 03 de dezembro de 2006. Disponível em <http://www.dec.estt.ipt.pt/trabalhos/20023353/legisla%C3%A7%C3%A3o.htm>. Portugal, 1990.**

RSB. Normas de Projecto de Barragens (portaria nº846/93). **Acessado em 13 de novembro de 2006. Disponível em <http://www.dec.estt.ipt.pt/trabalhos/20023353/legisla%C3%A7%C3%A3o.htm>. Portugal, 1993.**

RSB. Normas de Observação e Inspeção de Barragens (portaria nº847/93). **Acessado em 16 de novembro de 2006. Disponível em <http://www.dec.estt.ipt.pt/trabalhos/20023353/legisla%C3%A7%C3%A3o.htm>. Portugal, 1993.**

SILVA, Marina M. de A.; MEDEIROS, Maria J. L.; SILVA, Pollyana K.; SILVA, Mônica M. P. **Impactos Ambientais causados em decorrência do rompimento da Barragem Câmara no município de Alagoa Grande, PB**. Revista de Biologia e Ciências da Terra. Vol. 6, Número 1, 2006.

SILVEIRA, JOÃO F. A. **Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

SILVEIRA, JOÃO F. A. **Notas de Aula – Curso Segurança de Barragens – CSBE**. Bauru, São Paulo, 2004.

SARÉ, Alexandre R.; LIGOCKI, L. P.; SAYÃO, A.; GERSCOVICH, D. M.; PINHEIRO, G. F. **Revisão das Condições de Segurança da Barragem de Curuá-Uma (PA)**. Anais do COBRAMSEG 2006, Curitiba, Brasil, 2006.

SPIEGEL, MURRAY R. **Estatística**. 3 ed. São Paulo: Makron Books, 1993.

TOLEDO, G. L. **Estatística Básica**. 2 ed. São Paulo: Atlas, 1995.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. 7 ed. São Paulo: Ática, 1990.

VIEIRA, VICENTE DE PAULO P. B.; MENESCAL, R. A.; FONTELLE, A. S.; OLIVEIRA, S. K. F. **Incertezas, Ameaças e Medidas Preventivas nas Fases de Vida de Uma Barragem**. XIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais, Fortaleza – CE, 2001.

YIN, Robert K. **Estudo de Caso - Planejamento e Métodos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001, 212 p.

ANEXOS

ANEXO 1: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS BASES DE ALONGÂMETRO NA PAREDE

		data	51	51	52	52	53	53	54	54	55	55	56	56	57	57	58	58	59	59	60	60	61	61	62	62	63	63	64	64	65	65	66	66
			D	AF	D	AF	D	AF	D	AF	D	AF	D	AF	D	AF	D	AF	D	AF	D	AF	D	AF	D	AF	D	AF	D	AF	D	AF	D	AF
data		1,00	0,37	0,51	-0,86	0,17	0,74	0,12	0,77	0,36	0,68	0,38	-0,20	-0,78	-0,40	0,00	0,23	0,02	0,60	-0,19	0,36	-0,73	0,17	-0,21	-0,28	-0,40	0,65	-0,63	-0,53	0,06	0,01	-0,72	-0,02	-0,03
51	D	0,37	1,00	-0,17	-0,32	-0,22	0,10	-0,44	0,02	-0,27	-0,07	-0,32	0,24	-0,23	-0,19	-0,37	0,32	-0,43	0,16	-0,35	0,17	-0,30	0,20	-0,54	0,03	-0,59	0,27	-0,16	-0,39	-0,33	-0,43	-0,26	0,34	-0,34
51	AF	0,51	-0,17	1,00	-0,66	0,58	0,82	0,87	0,86	0,93	0,59	0,93	-0,41	-0,59	-0,34	0,69	-0,17	0,79	0,58	0,38	0,42	-0,51	-0,15	0,59	-0,55	0,43	0,31	-0,67	-0,25	0,44	0,55	-0,60	-0,53	0,35
52	D	-0,86	-0,32	-0,66	1,00	-0,43	-0,74	-0,33	-0,80	-0,54	-0,70	-0,51	0,31	0,80	0,42	-0,23	-0,15	-0,22	-0,58	0,10	-0,45	0,70	-0,06	0,06	0,35	0,25	-0,56	0,67	0,57	0,02	0,04	0,77	0,19	0,12
52	AF	0,17	-0,22	0,58	-0,43	1,00	0,36	0,59	0,35	0,61	0,13	0,57	-0,28	-0,16	-0,42	0,59	-0,36	0,55	0,17	0,41	0,19	0,07	-0,32	0,46	-0,57	0,45	-0,04	-0,06	-0,30	0,35	0,22	-0,03	-0,55	0,30
53	D	0,74	0,10	0,82	-0,74	0,36	1,00	0,62	0,89	0,72	0,68	0,75	-0,24	-0,72	-0,35	0,42	0,00	0,54	0,69	0,20	0,49	-0,71	0,03	0,33	-0,36	0,14	0,52	-0,79	-0,39	0,34	0,48	-0,72	-0,29	0,29
53	AF	0,12	-0,44	0,87	-0,33	0,59	0,62	1,00	0,65	0,90	0,40	0,93	-0,28	-0,29	-0,19	0,83	-0,38	0,94	0,43	0,60	0,22	-0,25	-0,29	0,88	-0,53	0,78	0,01	-0,47	0,03	0,60	0,74	-0,34	-0,63	0,53
54	D	0,77	0,02	0,86	-0,80	0,35	0,89	0,65	1,00	0,76	0,81	0,78	-0,33	-0,76	-0,31	0,44	0,02	0,54	0,74	0,19	0,38	-0,74	0,06	0,32	-0,41	0,10	0,53	-0,79	-0,24	0,30	0,42	-0,80	-0,32	0,19
54	AF	0,36	-0,27	0,93	-0,54	0,61	0,72	0,90	0,76	1,00	0,46	0,94	-0,33	-0,46	-0,37	0,69	-0,23	0,83	0,50	0,52	0,30	-0,37	-0,17	0,66	-0,53	0,56	0,21	-0,49	-0,16	0,46	0,58	-0,45	-0,58	0,38
55	D	0,68	-0,07	0,59	-0,70	0,13	0,68	0,40	0,81	0,46	1,00	0,54	-0,29	-0,76	0,04	0,20	0,18	0,27	0,68	-0,10	0,33	-0,68	0,25	0,08	-0,06	-0,11	0,55	-0,76	-0,13	0,02	0,24	-0,74	-0,08	-0,04
55	AF	0,38	-0,32	0,93	-0,51	0,57	0,75	0,93	0,78	0,94	0,54	1,00	-0,30	-0,50	-0,21	0,73	-0,27	0,87	0,59	0,49	0,27	-0,39	-0,20	0,74	-0,53	0,61	0,20	-0,56	-0,14	0,55	0,66	-0,48	-0,58	0,46
56	D	-0,20	0,24	-0,41	0,31	-0,28	-0,24	-0,28	-0,33	-0,33	-0,29	-0,30	1,00	0,20	0,10	-0,24	0,06	-0,28	0,06	0,04	-0,17	0,14	0,21	-0,09	0,16	-0,06	-0,24	0,08	0,24	0,01	0,05	0,21	0,32	0,07
56	AF	-0,78	-0,23	-0,59	0,80	-0,16	-0,72	-0,29	-0,76	-0,46	-0,76	-0,50	0,20	1,00	0,07	-0,09	-0,35	-0,10	-0,72	0,31	-0,56	0,79	-0,18	0,06	0,14	0,28	-0,73	0,75	0,41	0,05	-0,13	0,78	-0,02	0,08
57	D	-0,40	-0,19	-0,34	0,42	-0,42	-0,35	-0,19	-0,31	-0,37	0,04	-0,21	0,10	0,07	1,00	-0,25	0,26	-0,20	-0,04	-0,28	-0,06	0,17	0,22	-0,03	0,48	-0,01	-0,05	0,13	0,38	-0,14	0,02	0,21	0,18	-0,07
57	AF	0,00	-0,37	0,69	-0,23	0,59	0,42	0,83	0,44	0,69	0,20	0,73	-0,24	-0,09	-0,25	1,00	-0,46	0,88	0,25	0,68	0,09	-0,09	-0,34	0,81	-0,60	0,78	-0,18	-0,34	-0,02	0,50	0,52	-0,21	-0,67	0,44
58	D	0,23	0,32	-0,17	-0,15	-0,36	0,00	-0,38	0,02	-0,23	0,18	-0,27	0,06	-0,35	0,26	-0,46	1,00	-0,46	0,24	-0,47	0,36	-0,25	0,49	-0,52	0,35	-0,56	0,47	-0,13	-0,01	-0,42	-0,24	-0,22	0,53	-0,32
58	AF	0,02	-0,43	0,79	-0,22	0,55	0,54	0,94	0,54	0,83	0,27	0,87	-0,28	-0,10	-0,20	0,88	-0,46	1,00	0,33	0,73	0,10	-0,12	-0,37	0,91	-0,56	0,85	-0,11	-0,36	0,04	0,64	0,71	-0,22	-0,68	0,56
59	D	0,60	0,16	0,58	-0,58	0,17	0,69	0,43	0,74	0,50	0,68	0,59	0,06	-0,72	-0,04	0,25	0,24	0,33	1,00	0,18	0,34	-0,57	0,22	0,23	-0,20	0,04	0,49	-0,71	-0,06	0,20	0,38	-0,63	0,02	0,15
59	AF	-0,19	-0,35	0,38	0,10	0,41	0,20	0,60	0,19	0,52	-0,10	0,49	0,04	0,31	-0,28	0,68	-0,47	0,73	0,18	1,00	-0,28	0,26	-0,18	0,72	-0,53	0,76	-0,44	0,03	0,28	0,59	0,51	0,17	-0,50	0,55
60	D	0,36	0,17	0,42	-0,45	0,19	0,49	0,22	0,38	0,30	0,33	0,27	-0,17	-0,56	-0,06	0,09	0,36	0,10	0,34	-0,28	1,00	-0,45	0,07	-0,02	0,03	-0,12	0,58	-0,52	-0,40	-0,08	0,11	-0,42	0,05	-0,02
60	AF	-0,73	-0,30	-0,51	0,70	0,07	-0,71	-0,25	-0,74	-0,37	-0,68	-0,39	0,14	0,79	0,17	-0,09	-0,25	-0,12	-0,57	0,26	-0,45	1,00	-0,26	0,09	0,08	0,28	-0,78	0,80	0,40	0,12	-0,15	0,89	0,02	0,18
61	D	0,17	0,20	-0,15	-0,06	-0,32	0,03	-0,29	0,06	-0,17	0,25	-0,20	0,21	-0,18	0,22	-0,34	0,49	-0,37	0,22	-0,18	0,07	-0,26	1,00	-0,43	0,23	-0,43	0,23	-0,12	0,11	-0,33	-0,20	-0,17	0,25	-0,30
61	AF	-0,21	-0,54	0,59	0,06	0,46	0,33	0,88	0,32	0,66	0,08	0,74	-0,09	0,06	-0,03	0,81	-0,52	0,91	0,23	0,72	-0,02	0,09	-0,43	1,00	-0,49	0,95	-0,32	-0,19	0,26	0,75	0,79	0,01	-0,62	0,71
62	D	-0,28	0,03	-0,55	0,35	-0,57	-0,36	-0,53	-0,41	-0,53	-0,06	-0,53	0,16	0,14	0,48	-0,60	0,35	-0,56	-0,20	-0,53	0,03	0,08	0,23	-0,49	1,00	-0,41	0,15	0,15	0,21	-0,61	-0,30	0,12	0,60	-0,52
62	AF	-0,40	-0,59	0,43	0,25	0,45	0,14	0,78	0,10	0,56	-0,11	0,81	-0,06	0,28	-0,01	0,76	-0,56	0,85	0,04	0,76	-0,12	0,28	-0,43	0,95	-0,41	1,00	-0,44	0,04	0,30	0,70	0,72	0,20	-0,62	0,67
63	D	0,65	0,27	0,31	-0,56	-0,04	0,52	0,01	0,53	0,21	0,55	0,20	-0,24	-0,73	-0,05	-0,18	0,47	-0,11	0,49	-0,44	0,58	-0,78	0,23	-0,32	0,15	-0,44	1,00	-0,54	-0,41	-0,33	-0,01	-0,70	0,20	-0,35
63	AF	-0,63	-0,16	-0,67	0,67	-0,06	-0,79	-0,47	-0,79	-0,49	-0,76	-0,56	0,08	0,75	0,13	-0,34	-0,13	-0,36	-0,71	0,03	-0,52	0,80	-0,12	-0,19	0,15	0,04	-0,54	1,00	0,20	-0,08	-0,37	0,83	0,07	-0,06
64	D	-0,53	-0,39	-0,25	0,57	-0,30	-0,39	0,03	-0,24	-0,16	-0,13	-0,14	0,24	0,41	0,38	-0,02	-0,01	0,04	-0,06	0,28	-0,40	0,40	0,11	0,26	0,21	0,30	-0,41	0,20	1,00	0,22	0,29	0,38	0,14	0,25
64	AF	0,06	-0,33	0,44	0,02	0,35	0,34	0,60	0,30	0,46	0,02	0,55	0,01	0,05	-0,14	0,50	-0,42	0,64	0,20	0,59	-0,08	0,12	-0,33	0,75	-0,61	0,70	-0,33	-0,08	0,22	1,00	0,73	0,14	-0,55	0,96
65	D	0,01	-0,43	0,55	0,04	0,22	0,48	0,74	0,42	0,58	0,24	0,66	0,05	-0,13	0,02	0,52	-0,24	0,71	0,38	0,51	0,11	-0,15	-0,20	0,79	-0,30	0,72	-0,01	-0,37	0,29	0,73	1,00	-0,17	-0,37	0,76
65	AF	-0,72	-0,26	-0,60	0,77	-0,03	-0,72	-0,34	-0,80	-0,45	-0,74	-0,48	0,21	0,78	0,21	-0,21	-0,22	-0,22	-0,63	0,17	-0,42	0,89	-0,17	0,01	0,12	0,20	-0,70	0,83	0,38	0,14	-0,17	1,00	0,05	0,23
66	D	-0,02	0,34	-0,53	0,19	-0,55	-0,29	-0,63	-0,32	-0,58	-0,08	-0,58	0,32	-0,02	0,18	-0,67	0,53	-0,68	0,02	-0,50	0,05	0,02	0,25	-0,62	0,60	-0,62	0,20	0,07	0,14	-0,55	-0,37	0,05	1,00	-0,46
66	AF	-0,03	-0,34	0,35	0,12	0,30	0,29	0,53	0,19	0,38	-0,04	0,46	0,07	0,08	-0,07	0,44	-0,32	0,56	0,15	0,55	-0,02	0,18	-0,30	0,71	-0,52	0,67	-0,35	-0,06	0,25	0,96	0,76	0,23	-0,46	1,00

ANEXO 2: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS BASES DE ALONGÂMETRO NO PISO COM AS BASES DE ALONGAMETRO NA PAREDE

JSF		data	50	50
			D	AF
data		1,00	0,69	0,45
50	D	0,69	1,00	0,41
50	AF	0,45	0,41	1,00
51	D	0,37	0,35	-0,22
51	AF	0,51	0,52	0,96
52	D	-0,86	-0,60	-0,66
52	AF	0,17	0,01	0,60
53	D	0,74	0,63	0,79
53	AF	0,12	0,26	0,88
54	D	0,77	0,69	0,83
54	AF	0,36	0,35	0,95
55	D	0,68	0,55	0,59
55	AF	0,38	0,40	0,92
56	D	-0,20	-0,31	-0,34
56	AF	-0,78	-0,57	-0,60
57	D	-0,40	-0,14	-0,33
57	AF	0,00	0,10	0,70
58	D	0,23	0,25	-0,16
58	AF	0,02	0,23	0,78
59	D	0,60	0,54	0,57
59	AF	-0,19	-0,03	0,39
60	D	0,36	0,34	0,41
60	AF	-0,73	-0,56	-0,50
61	D	0,17	0,08	-0,15
61	AF	-0,21	0,05	0,59
62	D	-0,28	-0,31	-0,50
62	AF	-0,40	-0,14	0,45
63	D	0,65	0,44	0,30
63	AF	-0,63	-0,57	-0,66
64	D	-0,53	-0,16	-0,19
64	AF	0,06	0,27	0,40
65	D	0,01	0,23	0,53
65	AF	-0,72	-0,60	-0,57
66	D	-0,02	0,01	-0,54
66	AF	-0,03	0,18	0,33

ANEXO 3: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS TENSÔMETROS

TNF		data	21	21	22	22	23	23	25	25
			temp	tens	temp	tens	temp	tens	temp	tens
data		1,00	-0,14	-0,34	-0,25	0,11	-0,12	0,21	-0,07	-0,31
21	temp	-0,14	1,00	-0,22	0,96	-0,04	0,98	-0,67	0,94	-0,79
21	tens	-0,34	-0,22	1,00	-0,28	0,76	-0,10	0,71	-0,06	0,41
22	temp	-0,25	0,96	-0,28	1,00	-0,25	0,90	-0,75	0,83	-0,69
22	tens	0,11	-0,04	0,76	-0,25	1,00	0,11	0,68	0,19	0,05
23	temp	-0,12	0,98	-0,10	0,90	0,11	1,00	-0,56	0,97	-0,78
23	tens	0,21	-0,67	0,71	-0,75	0,68	-0,56	1,00	-0,51	0,57
25	temp	-0,07	0,94	-0,06	0,83	0,19	0,97	-0,51	1,00	-0,84
25	tens	-0,31	-0,79	0,41	-0,69	0,05	-0,78	0,57	-0,84	1,00

ANEXO 4: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS MEDIDORES ELÉTRICOS DE JUNTAS

JIF			10	10	12	12	15	15	16	16	17	17	21	21	22	22
		DIA	temp	desloc	temp	deslo	temp	deslo	temp	deslo	temp	deslo	temp	deslo	temp	deslo
	DIA	1,00	-0,27	-0,60	-0,24	-0,20	-0,19	-0,93	-0,25	0,12	-0,27	-0,19	-0,18	-0,12	-0,17	-0,27
10	temp	-0,27	1,00	0,08	0,99	-0,11	0,96	0,22	0,98	-0,36	0,99	-0,28	0,89	0,02	0,91	0,06
10	desloc	-0,60	0,08	1,00	0,05	0,64	0,00	0,60	0,04	0,40	0,04	0,45	-0,04	0,45	-0,04	0,59
12	temp	-0,24	0,99	0,05	1,00	-0,16	0,98	0,18	0,99	-0,37	1,00	-0,30	0,92	0,00	0,94	0,05
12	desloc	-0,20	-0,11	0,64	-0,16	1,00	-0,26	0,29	-0,21	0,50	-0,18	0,41	-0,34	0,32	-0,31	0,43
15	temp	-0,19	0,96	0,00	0,98	-0,26	1,00	0,11	0,99	-0,38	0,99	-0,29	0,98	-0,01	0,98	0,05
15	desloc	-0,93	0,22	0,60	0,18	0,29	0,11	1,00	0,18	0,07	0,21	0,30	0,11	0,21	0,11	0,31
16	temp	-0,25	0,98	0,04	0,99	-0,21	0,99	0,18	1,00	-0,36	1,00	-0,27	0,96	0,00	0,97	0,07
16	desloc	0,12	-0,36	0,40	-0,37	0,50	-0,38	0,07	-0,36	1,00	-0,37	0,40	-0,35	0,44	-0,35	0,47
17	temp	-0,27	0,99	0,04	1,00	-0,18	0,99	0,21	1,00	-0,37	1,00	-0,28	0,95	0,01	0,96	0,06
17	desloc	-0,19	-0,28	0,45	-0,30	0,41	-0,29	0,30	-0,27	0,40	-0,28	1,00	-0,26	0,55	-0,27	0,50
21	temp	-0,18	0,89	-0,04	0,92	-0,34	0,98	0,11	0,96	-0,35	0,95	-0,26	1,00	-0,02	1,00	0,06
21	desloc	-0,12	0,02	0,45	0,00	0,32	-0,01	0,21	0,00	0,44	0,01	0,55	-0,02	1,00	-0,02	0,63
22	temp	-0,17	0,91	-0,04	0,94	-0,31	0,98	0,11	0,97	-0,35	0,96	-0,27	1,00	-0,02	1,00	0,04
22	desloc	-0,27	0,06	0,59	0,05	0,43	0,05	0,31	0,07	0,47	0,06	0,50	0,06	0,63	0,04	1,00

ANEXO 5: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE ROSETAS DE TENSÔMETRO

RTF			21 2	21 3	21 4	22 2	22 3	22 4	23 2	23 3	23 4	24 2	24 3	24 4	25 2	25 3	25 4	26 2	26 3	26 4
		data	tens	tens	tens	tens	tens	tens	tens	tens	tens	tens	tens	tens	tens	tens	tens	tens	tens	tens
	data	1,00	-0,14	0,10	0,24	0,40	0,52	0,35	-0,16	-0,09	0,41	-0,31	-0,21	-0,25	-0,09	-0,30	-0,02	-0,40	-0,26	-0,44
21 2	tens	-0,14	1,00	0,63	0,53	0,33	0,31	0,40	0,40	0,41	0,39	0,14	0,17	0,19	0,09	0,18	0,03	0,37	0,20	0,22
21 3	tens	0,10	0,63	1,00	0,96	0,46	0,62	0,61	0,49	0,54	0,70	-0,03	0,02	0,03	-0,05	0,02	0,20	0,20	0,01	0,16
21 4	tens	0,24	0,53	0,96	1,00	0,50	0,69	0,68	0,44	0,52	0,77	-0,05	0,00	-0,01	-0,08	-0,04	0,21	0,16	-0,01	0,08
22 2	tens	0,40	0,33	0,46	0,50	1,00	0,81	0,69	-0,09	-0,08	0,35	-0,47	-0,59	-0,62	-0,60	-0,60	0,63	-0,21	-0,50	-0,15
22 3	tens	0,52	0,31	0,62	0,69	0,81	1,00	0,88	0,16	0,19	0,63	-0,28	-0,38	-0,43	-0,42	-0,44	0,49	-0,03	-0,28	-0,11
22 4	tens	0,35	0,40	0,61	0,68	0,69	0,88	1,00	0,31	0,33	0,67	-0,07	-0,18	-0,24	-0,25	-0,24	0,38	0,19	-0,06	-0,04
23 2	tens	-0,16	0,40	0,49	0,44	-0,09	0,16	0,31	1,00	0,98	0,68	0,42	0,54	0,52	0,48	0,52	-0,34	0,57	0,55	0,35
23 3	tens	-0,09	0,41	0,54	0,52	-0,08	0,19	0,33	0,98	1,00	0,76	0,46	0,59	0,57	0,53	0,55	-0,39	0,58	0,58	0,36
23 4	tens	0,41	0,39	0,70	0,77	0,35	0,63	0,67	0,68	0,76	1,00	0,19	0,27	0,23	0,22	0,16	-0,12	0,33	0,26	0,10
24 2	tens	-0,31	0,14	-0,03	-0,05	-0,47	-0,28	-0,07	0,42	0,46	0,19	1,00	0,78	0,72	0,67	0,69	-0,60	0,65	0,71	0,49
24 3	tens	-0,21	0,17	0,02	0,00	-0,59	-0,38	-0,18	0,54	0,59	0,27	0,78	1,00	0,98	0,93	0,91	-0,89	0,65	0,89	0,32
24 4	tens	-0,25	0,19	0,03	-0,01	-0,62	-0,43	-0,24	0,52	0,57	0,23	0,72	0,98	1,00	0,94	0,92	-0,89	0,62	0,89	0,30
25 2	tens	-0,09	0,09	-0,05	-0,08	-0,60	-0,42	-0,25	0,48	0,53	0,22	0,67	0,93	0,94	1,00	0,96	-0,94	0,59	0,90	0,24
25 3	tens	-0,30	0,18	0,02	-0,04	-0,60	-0,44	-0,24	0,52	0,55	0,16	0,69	0,91	0,92	0,96	1,00	-0,83	0,67	0,90	0,35
25 4	tens	-0,02	0,03	0,20	0,21	0,63	0,49	0,38	-0,34	-0,39	-0,12	-0,60	-0,89	-0,89	-0,94	-0,83	1,00	-0,41	-0,78	-0,11
26 2	tens	-0,40	0,37	0,20	0,16	-0,21	-0,03	0,19	0,57	0,58	0,33	0,65	0,65	0,62	0,59	0,67	-0,41	1,00	0,85	0,41
26 3	tens	-0,26	0,20	0,01	-0,01	-0,50	-0,28	-0,06	0,55	0,58	0,26	0,71	0,89	0,89	0,90	0,90	-0,78	0,85	1,00	0,29
26 4	tens	-0,44	0,22	0,16	0,08	-0,15	-0,11	-0,04	0,35	0,36	0,10	0,49	0,32	0,30	0,24	0,35	-0,11	0,41	0,29	1,00

ANEXO 6: MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS TERMÔMETROS DE MASSA INTERNO

TIF	data	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
data	1,00	-0,29	-0,30	-0,34	-0,22	-0,25	-0,25	-0,23	-0,22	-0,37	-0,88	-0,86	-0,20	-0,24	0,59	-0,03	-0,07
21	-0,29	1,00	0,82	0,27	0,80	0,27	0,21	0,89	0,10	0,44	0,61	0,60	0,89	0,03	0,35	0,21	-0,08
22	-0,30	0,82	1,00	0,29	0,99	0,14	0,03	0,98	-0,06	0,26	0,63	0,57	0,75	-0,09	0,09	0,12	-0,17
23	-0,34	0,27	0,29	1,00	0,28	0,88	0,77	0,24	0,85	0,63	0,24	0,33	0,26	0,87	-0,39	-0,01	0,72
24	-0,22	0,80	0,99	0,28	1,00	0,12	0,00	0,98	-0,09	0,22	0,56	0,49	0,75	-0,12	0,13	0,09	-0,19
25	-0,25	0,27	0,14	0,88	0,12	1,00	0,97	0,15	0,95	0,88	0,19	0,38	0,28	0,92	-0,10	0,39	0,87
26	-0,25	0,21	0,03	0,77	0,00	0,97	1,00	0,04	0,95	0,93	0,17	0,38	0,17	0,90	-0,03	0,52	0,92
27	-0,23	0,89	0,98	0,24	0,98	0,15	0,04	1,00	-0,06	0,29	0,59	0,54	0,83	-0,11	0,25	0,17	-0,17
28	-0,22	0,10	-0,06	0,85	-0,09	0,95	0,95	-0,06	1,00	0,79	0,05	0,24	0,08	0,98	-0,18	0,26	0,94
29	-0,37	0,44	0,26	0,63	0,22	0,88	0,93	0,29	0,79	1,00	0,42	0,62	0,38	0,71	0,09	0,69	0,75
30	-0,88	0,61	0,63	0,24	0,56	0,19	0,17	0,59	0,05	0,42	1,00	0,96	0,51	0,04	-0,27	0,19	-0,09
31	-0,86	0,60	0,57	0,33	0,49	0,38	0,38	0,54	0,24	0,62	0,96	1,00	0,48	0,20	-0,23	0,38	0,12
32	-0,20	0,89	0,75	0,26	0,75	0,28	0,17	0,83	0,08	0,38	0,51	0,48	1,00	0,03	0,31	0,20	-0,07
33	-0,24	0,03	-0,09	0,87	-0,12	0,92	0,90	-0,11	0,98	0,71	0,04	0,20	0,03	1,00	-0,29	0,15	0,93
34	0,59	0,35	0,09	-0,39	0,13	-0,10	-0,03	0,25	-0,18	0,09	-0,27	-0,23	0,31	-0,29	1,00	0,44	-0,11
35	-0,03	0,21	0,12	-0,01	0,09	0,39	0,52	0,17	0,26	0,69	0,19	0,38	0,20	0,15	0,44	1,00	0,40
36	-0,07	-0,08	-0,17	0,72	-0,19	0,87	0,92	-0,17	0,94	0,75	-0,09	0,12	-0,07	0,93	-0,11	0,40	1,00

