

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA GODKE

PROPOSTA DE PROCESSO DE MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO  
DAS FISSURAS TÉRMICAS EM BARRAGENS DE CONCRETO GRAVIDADE: UM  
ESTUDO DE CASO

CURITIBA  
2014

BRUNA GODKE

PROPOSTA DE PROCESSO DE MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO  
DAS FISSURAS TÉRMICAS EM BARRAGENS DE CONCRETO GRAVIDADE: UM  
ESTUDO DE CASO

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Departamento de Construção Civil, da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana de Paula Lacerda Santos

Co-Orientador: Prof. Dr. José Marques Filho

CURITIBA  
2014

Godke, Bruna

Proposta de processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade: um estudo de caso / Bruna Godke. – Curitiba, 2014.

143 f. : il.; graf., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil.

Orientadora: Adriana de Paula Lacerda Santos

Coorientador: José Marques Filho

1. Barragens - Segurança. 2. Barragens de concreto. 3. Barragens - Inspeção. I. Santos, Adriana de Paula Lacerda. II. Marques Filho, José. III. Título.

CDD: 627.82

## TERMO DE APROVAÇÃO

BRUNA GODKE

### **PROPOSTA DE PROCESSO DE MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO DAS FISSURAS TÉRMICAS EM BARRAGENS DE CONCRETO GRAVIDADE: UM ESTUDO DE CASO**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Ambiente Construído e Gestão, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientadora: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Adriana de Paula Lacerda Santos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil -  
UFPR

Co-orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. José Marques Filho

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil -  
UFPR

Examinadores: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Sergio Scheer

Programa Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil –  
UFPR

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Mauro Lacerda Santos Filho

Departamento de Construção Civil da UFPR

Curitiba, 06 de junho de 2014

## **AGRADECIMENTOS**

À minha orientadora, Professora Adriana de Paula Lacerda Santos, pelos conhecimentos transmitidos, pelo incentivo para completar o Mestrado, pela orientação na realização deste trabalho e, principalmente, pela compreensão quanto a minha situação de mestrandia e profissional durante o curso.

Ao Professor José Marques Filho, por ter me aceito como co-orientanda, pela ajuda na definição do método de pesquisa e pelas valiosas contribuições a este trabalho.

Aos professores, colegas e amigos do Programa de Pós Graduação em Engenharia da Construção Civil pelo convívio e apoio.

À COPEL por permitir e incentivar a realização deste Mestrado. Ao Marcos que me ajudou na definição do tema e me auxiliou na coleta de dados. Aos colegas Isabela, Maria Izabel, Cintia, Nelma, Everton, Kironi, Hudson, Luiz, André, Gabriela e Elizeu pela amizade e pelo estímulo na realização deste trabalho.

Ao meu marido Gregorio, pelo apoio absoluto, pela compreensão, pela paciência e, especialmente, pelo incentivo em todos os momentos.

Aos meus amigos e familiares pela demonstração de apreço e palavras de incentivo.

## RESUMO

Diversas barragens no mundo já romperam, provocando danos ambientais, sociais e econômicos. A preocupação em evitar futuros desastres impulsionou a criação de legislação governamental em diversos países, que no caso do Brasil entrou em vigor com a Lei nº 12.334/2010, a qual estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). De maneira geral, esta política obriga os responsáveis a investirem na preservação de suas estruturas e no aprimoramento de seus sistemas de monitoramento, de forma a proporcionarem respostas mais rápidas e objetivas. Como ferramentas do monitoramento, as inspeções visuais propiciam a avaliação global da performance das estruturas, enquanto a instrumentação de auscultação agrega informações pontuais sobre mudanças operacionais ou de comportamento, provendo um alarme quando um indicador de desempenho exceder os limites estabelecidos como aceitáveis. Estes valores limites podem ser definidos através de métodos estatísticos, baseados na relação entre as medidas dos instrumentos e outras variáveis, como o nível do reservatório, período do ano ou medida de outros instrumentos. Além dos parâmetros de projeto (subpressão da fundação, deslocamentos, entre outros), a instrumentação de barragens também pode ser utilizada para monitorar o comportamento de manifestações patológicas. Especificamente em barragens de concreto gravidade, dentre as principais causas do surgimento de fissuras, destacam-se as alterações volumétricas geradas pelos fenômenos de origem térmica no concreto, que estão associados ao processo construtivo destas estruturas. Com base nisso, o objetivo geral desta pesquisa foi propor um processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade, por meio da análise dos dados de instrumentação e no estabelecimento de valores de controle. Para isso, foi selecionada como estudo de caso a fissura do bloco B-11 da barragem da Usina Hidrelétrica Governador José Richa (GJR), que foi identificada antes mesmo do enchimento do reservatório, em agosto de 1998, e onde foram instalados fissurômetros e termômetros superficiais para o seu monitoramento. Embora estes instrumentos tenham sido instalados em maio de 2004, a pesquisa restringiu os estudos aos últimos 4,5 anos (de junho de 2009 a novembro de 2013), pois neste período todos os instrumentos já estavam calibrados e produziram dados confiáveis. O método adotado baseou-se em procedimentos simples de cálculo de correlação linear simples, para o entendimento das interações existentes entre as séries temporais dos instrumentos, verificando-se os tempos de resposta entre eles. A partir das melhores correlações foram estabelecidos os diagramas de dispersão, que subsidiaram a determinação dos valores limites de controle. Dentre os resultados encontrados destaca-se que existe forte ou muito forte correlação entre a temperatura ambiente, as leituras dos fissurômetros e as leituras do medidor de vazão. Com base nos resultados desta análise estatística, foi possível desenvolver, satisfatoriamente, uma ferramenta de monitoramento do comportamento da fissura em estudo. Desta forma, foi atendido o objetivo da pesquisa de desenvolver uma proposta de processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade.

Palavras-chave: Segurança de barragens; monitoramento; instrumentação; barragem de concreto gravidade; fissuras de origem térmica; correlação linear simples; valores de controle.

## ABSTRACT

Several dams in the world have already collapsed, causing environmental, social and economic damage. The concern to avoid future disasters has stimulated the creation of legislation in many countries. In Brazil, law 12.334/2010 was created, which establishes the National Policy on Safety of Dams. Overall, this policy requires keepers to invest in the preservation of their structures and to improve its monitoring systems in order to provide faster and straightforward responses. As monitoring tools, visual inspections provide a comprehensive assessment of the structures's performance, while auscultation's instrumentation adds specific information on operational or behavioral changes, providing an alarm when a performance indicator exceeds the acceptable limits. These limits can be set using statistical methods based on the relationship between instruments's measures and other variables, such as reservoir level, time of year or others instruments measuring. Besides the design parameters (uplift foundation, displacements, etc.), the dam's instrumentation can also be used to monitor the behavior of pathological manifestations. Specifically in concrete gravity dams, one of the main causes for the appearance of cracks, are the concrete's volumetric changes generated by the thermal origin phenomena, which are associated with the construction process of these structures. Based on this, the goal of this research is to propose a monitoring process of the thermal cracking behavior in concrete gravity dams, through the instrumentation data analysis and the establishment of control values. Therefore, as a case study was selected the Block B-11's crack at Governador José Richa (GJR) Dam's Power Plant, which was identified even before filling the reservoir in August' 1998, and where were installed crackmeters and surface thermometers for its monitoring. Although these instruments were installed in May 2004, the research was restricted to study the last 4.5 years (June 2009 to November 2013), when all the instruments were calibrated and producing reliable data. The adopted method is based on simple linear correlation's procedures to understand the interactions between the instruments's time series, verifying the response times between them. The scatter plots were made from the best correlations, which supported the definition of the limit control values. Among the findings it is noteworthy that there is a strong or very strong correlation between ambient temperature and the crackmeters and flowmeters measurements. Based on the results of the statistical analysis, it was possible to satisfactorily develop a tool for monitoring the behavior of the case study cracks. Thus it was fulfilled the goal of the research to develop a proposal for a monitoring process of the behavior of thermal cracking in concrete gravity dams.

Keywords: Dams Safety; monitoring; instrumentation; concrete gravity dam; thermal origin crack; simple linear correlation; control values.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma típico de operação de estruturas.....	14
Figura 2 – Fluxograma típico de monitoramento de estruturas.....	15
Figura 3 – Instrumentos de barragens de concreto .....	22
Figura 4 – Fissurômetro.....	23
Figura 5 – Termômetro elétrico, conectado ao cabo de leitura.....	24
Figura 6 – Medidores de vazão, sendo trapezoidal a esquerda e triangular (90°) a direita.....	24
Figura 7 – Estratégia do desenvolvimento da pesquisa .....	33
Figura 8 – Foto aérea da Usina Hidrelétrica Governador José Richa.....	40
Figura 9 – Seções transversais da barragem, sendo a esquerda uma junta de contração completa e a direita uma junta de contração parcial.....	42
Figura 10 – Detalhe dos vedajuntas e dreno .....	42
Figura 11 – Etapas de construção dos blocos B-5 a B-11 e perspectiva da seção da barragem do bloco B-11 .....	46
Figura 12 – Esquema da seção transversal do bloco B-11 da barragem da UHE GJR e localização dos instrumentos.....	52
Figura 13 – Foto do fissurômetro FIS3, instalado na galeria inferior da barragem da UHE GJR.....	53
Figura 14 – Foto do medidor de vazão MVZ6, localizado na galeria inferior da barragem da UHE GJR.....	53
Figura 15 – Foto do termômetro de superfície TER1, localizado na face de jusante da barragem da UHE GJR.....	54
Figura 16 – Foto do termômetro de superfície TER2, localizado na face de montante da barragem da UHE GJR.....	54
Figura 17 – Nível de água do reservatório da UHE GJR, de janeiro de 2009 a janeiro de 2014.....	57
Figura 18 – Coeficientes de correlação entre TER1 e MVZ6.....	60
Figura 19 – Séries históricas de TER1, MVZ6 e MVZ6 (-11S) .....	61
Figura 20 – Diagrama de dispersão de TER1 por MVZ6.....	62
Figura 21 – Diagrama de dispersão de TER1 por MVZ6 (-11S).....	62
Figura 22 – Coeficientes de correlação entre TER2 e MVZ6.....	63
Figura 23 – Séries históricas de TER2, MVZ6 e MVZ6 (-11S) .....	64



Figura 24 – Diagrama de dispersão de TER2 por MVZ6.....	65
Figura 25 – Diagrama de dispersão de TER2 por MVZ6 (-11S).....	65
Figura 26 – Coeficientes de correlação entre FIS3 e MVZ6.....	66
Figura 27 – Séries históricas de FIS3, MVZ6 e MVZ6 (-1S).....	67
Figura 28 – Diagrama de dispersão de FIS3 por MVZ6.....	68
Figura 29 – Diagrama de dispersão de FIS3 por MVZ6 (-1S).....	68
Figura 30 – Coeficientes de correlação entre FIS4 e MVZ6.....	69
Figura 31 – Séries históricas de FIS4, MVZ6 e MVZ6 (-3S).....	70
Figura 32 – Diagrama de dispersão de FIS4 por MVZ6.....	71
Figura 33 – Diagrama de dispersão de FIS4 por MVZ6 (-3S).....	71
Figura 34 – Coeficientes de correlação entre FIS7 e MVZ6.....	72
Figura 35 – Séries históricas de FIS7, MVZ6 e MVZ6 (-3S).....	73
Figura 36 – Diagrama de dispersão de FIS7 por MVZ6.....	74
Figura 37 – Diagrama de dispersão de FIS7 por MVZ6 (-3S).....	74
Figura 38 – Coeficientes de correlação entre TER1 e FIS3.....	76
Figura 39 – Séries históricas de TER1, FIS3 e FIS3 (-6S).....	77
Figura 40 – Diagrama de dispersão de TER1 por FIS3.....	78
Figura 41 – Diagrama de dispersão de TER1 por FIS3 (-6S).....	78
Figura 42 – Coeficientes de correlação entre TER1 e FIS4.....	79
Figura 43 – Séries históricas de TER1, FIS4 e FIS4 (-9S).....	80
Figura 44 – Diagrama de dispersão de TER1 por FIS4.....	81
Figura 45 – Diagrama de dispersão de TER1 por FIS4 (-9S).....	81
Figura 46 – Coeficientes de correlação entre TER1 e FIS7.....	82
Figura 47 – Séries históricas de TER1, FIS7 e FIS7 (-9S).....	84
Figura 48 – Diagrama de dispersão de TER1 por FIS7.....	84
Figura 49 – Diagrama de dispersão de TER1 por FIS7 (-9S).....	84
Figura 50 – Coeficientes de correlação entre TER2 e FIS3.....	86
Figura 51 – Séries históricas de TER2, FIS3 e FIS3 (-5S).....	87
Figura 52 – Diagrama de dispersão de TER2 por FIS3.....	88
Figura 53 – Diagrama de dispersão de TER2 por FIS3 (-5S).....	88
Figura 54 – Coeficientes de correlação entre TER2 e FIS4.....	89
Figura 55 – Séries históricas de TER2, FIS4 e FIS4 (-5S).....	90
Figura 56 – Diagrama de dispersão de TER2 por FIS4.....	91
Figura 57 – Diagrama de dispersão de TER2 por FIS4 (-5S).....	91

Figura 58 – Coeficientes de correlação entre TER2 e FIS7.....	92
Figura 59 – Séries históricas de TER2, FIS7 e FIS7 (-5S) .....	93
Figura 60 – Diagrama de dispersão de TER2 por FIS7.....	94
Figura 61 – Diagrama de dispersão de TER2 por FIS7 (-5S).....	94
Figura 62 – Coeficientes de correlação entre TER1 e TER2 .....	95
Figura 63 – Séries históricas de TER1 e TER2 .....	96
Figura 64 – Diagrama de dispersão de TER1 por TER2 .....	97
Figura 65 – Coeficientes de correlação entre FIS3 e FIS4 .....	98
Figura 66 – Séries históricas de FIS3 e FIS4 .....	99
Figura 67 – Diagrama de dispersão de FIS3 por FIS4 .....	99
Figura 68 – Coeficientes de correlação entre FIS3 e FIS7 .....	101
Figura 69 – Séries históricas de FIS3 e FIS7 .....	102
Figura 70 – Diagrama de dispersão de FIS3 por FIS7 .....	102
Figura 71 – Coeficientes de correlação entre FIS4 e FIS7 .....	104
Figura 72 – Séries históricas de FIS4 e FIS7 .....	105
Figura 73 – Diagrama de dispersão de FIS4 por FIS7 .....	105
Figura 74 – Coeficientes de correlação entre NA e TER2 .....	107
Figura 75 – Séries históricas de NA e TER2 .....	108
Figura 76 – Diagrama de dispersão de TER2 por NA .....	108
Figura 77 – Diagrama de dispersão de TER2 por NA (-1S).....	108
Figura 78 – Coeficientes de correlação entre NA e MVZ6.....	110
Figura 79 – Séries históricas de NA e MVZ6.....	111
Figura 80 – Diagrama de dispersão de MVZ6 por NA.....	111
Figura 81 – Diagrama de dispersão de MVZ6 por NA (+3S) .....	111
Figura 82 – Limites mínimos e máximos de MVZ6 (caso houvesse relação linear perfeita).....	114
Figura 83 – Limites mínimos e máximos de MVZ6 do modelo proposto (com indicação das médias semanais das leituras de MVZ6).....	115
Figura 84 – Limites mínimos e máximos de MVZ6 do modelo proposto (com indicação das médias semanais das leituras de MVZ6, bem como as leituras individuais) .....	116
Figura 85 – Origem dos valores limites máximos .....	117
Figura 86 – Dados de entrada e informações de saída da ferramenta gerencial .....	118
Figura 87 – Exemplo de relatório de monitoramento elaborado no MS Excel .....	119

Figura 88 – Fluxograma de processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade.....	122
Figura 89 – Coeficientes de correlação .....	126
Figura 90 – Fluxograma de processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade (sem ilustrações) ...	143

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição das grandes barragens por país no mundo.....	9
Tabela 2 – Situações relevantes para diferentes estratégias de pesquisa .....	31
Tabela 3 – Caracterização da pesquisa.....	32
Tabela 4 – Interpretação do coeficiente de correlação .....	37
Tabela 5 – Conjunto de causas prováveis de ocorrência das fissuras .....	45
Tabela 6 – Especificações dos fissurômetros instalados no bloco B-11 da UH GJR .....	50
Tabela 7 – Especificações dos termômetros instalados no bloco B-11 da UH GJR.....	51
Tabela 8 – Leituras iniciais dos fissurômetros instalados no bloco B-11 da UH GJR.....	55
Tabela 9 – Instrumentos de auscultação da fissura do bloco B-11 da barragem da UHE GJR.....	57
Tabela 10 – Intervalo e número de dados disponíveis e abordados de cada instrumento.....	58
Tabela 11 – Coeficientes de correlação entre TER1 e MVZ6.....	60
Tabela 12 – Coeficientes de correlação entre TER2 e MVZ6.....	63
Tabela 13 – Coeficientes de correlação entre FIS3 e MVZ6 .....	66
Tabela 14 – Coeficientes de correlação entre FIS4 e MVZ6 .....	69
Tabela 15 – Coeficientes de correlação entre FIS7 e MVZ6 .....	72
Tabela 16 – Coeficientes de correlação entre TER1 e FIS3.....	75
Tabela 17 – Coeficientes de correlação entre TER1 e FIS4.....	79
Tabela 18 – Coeficientes de correlação entre TER1 e FIS7.....	82
Tabela 19 – Coeficientes de correlação entre TER2 e FIS3.....	85
Tabela 20 – Coeficientes de correlação entre TER2 e FIS4.....	89
Tabela 21 – Coeficientes de correlação entre TER2 e FIS7.....	92
Tabela 22 – Coeficientes de correlação entre TER1 e TER2 .....	95
Tabela 23 – Coeficientes de correlação entre FIS3 e FIS4 .....	97
Tabela 24 – Coeficientes de correlação entre FIS3 e FIS7 .....	100
Tabela 25 – Coeficientes de correlação entre FIS4 e FIS7 .....	103
Tabela 26 – Coeficientes de correlação entre NA e TER2 .....	107
Tabela 27 – Coeficientes de correlação entre NA e MVZ6.....	109
Tabela 28 – Coeficientes de correlação ( $\rho$ ) entre os instrumentos da fissura do bloco B-11 .....	112

Tabela 29 – Melhores tempos de resposta entre os instrumentos da fissura do bloco B-11 .....	112
Tabela 30 – Equações de regressão linear e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre os instrumentos da fissura do bloco B-11 .....	113
Tabela 31 – Dados utilizados na montagem da ferramenta de controle e monitoramento da fissura do bloco-B11, em relação ao MVZ6 .....	113
Tabela 32 – Principais legislações internacionais relacionadas à Segurança de Barragens .....	137
Tabela 33 – Critérios adotados mundialmente para aplicação da legislação sobre segurança de barragens ou para a necessidade de elaboração de planos de emergência .....	140

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA .....	3
1.2. OBJETIVOS .....	3
1.2.1 Objetivo geral .....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	4
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>6</b>
2.1. SEGURANÇA DE BARRAGENS .....	6
2.1.1 Ocorrências de ruptura de barragens .....	6
2.1.2 Segurança de Barragens no mundo .....	8
2.1.3 Segurança de Barragens no Brasil .....	10
2.2. MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE BARRAGEM .....	13
2.2.1 Instrumentação de barragens .....	16
2.2.2 Instrumentos de auscultação de barragens de concreto .....	21
2.3. BARRAGENS DE CONCRETO GRAVIDADE .....	25
2.3.1 Durabilidade de estruturas de concreto .....	26
2.3.2 Fissuração em barragens devido a efeitos térmicos .....	27
<b>3. MÉTODO DA PESQUISA</b> .....	<b>30</b>
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA .....	30
3.2. UNIDADE DE ANÁLISE E ESCOLHA DO ESTUDO DE CASO .....	32
3.3. VISÃO GERAL DA PESQUISA .....	32
3.3.1 Primeiro estágio: coleta e preparação de dados .....	34
3.3.2 Segundo estágio: tratamento dos dados e análise dos resultados .....	34
3.3.2.1 Correlação entre duas variáveis .....	34
3.3.2.2 Critério de Interpretação do coeficiente de correlação .....	36
3.3.2.3 Determinação da maior correlação entre duas variáveis .....	37
3.3.2.4 Diagramas de dispersão e equações de regressão linear .....	38
3.3.2.5 Ferramenta de controle e monitoramento .....	39
3.3.3 Terceiro estágio: conclusão .....	39
<b>4. O ESTUDO DE CASO - FISSURA DO BLOCO B-11 DA BARRAGEM DA UHE GJR</b> .....	<b>40</b>
4.1. CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM .....	43
4.2. IDENTIFICAÇÃO DE FISSURAS .....	44
4.3. ESTABILIDADE DA BARRAGEM COM A FISSURA DO BLOCO B-11 .....	46

4.4.	TRATAMENTOS EFETUADOS NA FISSURA DO BLOCO B-11 .....	47
4.5.	VAZÕES DE PERCOLAÇÃO .....	48
4.6.	INSTRUMENTAÇÃO COMPLEMENTAR .....	49
4.6.1	Especificações dos fissurômetros e termômetros .....	50
4.6.2	Localização dos instrumentos .....	51
4.6.3	Leituras iniciais dos fissurômetros .....	55
4.6.4	Análise dos dados entre 21/05/2004 e 19/01/2005 .....	55
4.7.	DADOS E PERÍODO ANALISADOS NESTA PESQUISA .....	56
4.8.	PREPARAÇÃO DOS DADOS .....	57
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS .....</b>	<b>59</b>
5.1.	CORRELAÇÕES ENTRE PARES DE INSTRUMENTOS .....	59
5.1.1	Correlação entre o medidor de vazão MVZ6 e o termômetro TER1 .....	59
5.1.2	Correlação entre o medidor de vazão MVZ6 e o termômetro TER2 .....	62
5.1.3	Correlação entre o medidor de vazão MVZ6 e o fissurômetro FIS3 .....	65
5.1.4	Correlação entre o medidor de vazão MVZ6 e o fissurômetro FIS4 .....	68
5.1.5	Correlação entre o medidor de vazão MVZ6 e o fissurômetro FIS7 .....	71
5.1.6	Correlação o termômetro TER1 e o fissurômetro FIS3 .....	74
5.1.7	Correlação entre o termômetro TER1 e o fissurômetro FIS4 .....	78
5.1.8	Correlação entre o termômetro TER1 e o fissurômetro FIS7 .....	81
5.1.9	Correlação entre o termômetro TER2 e o fissurômetro FIS3 .....	85
5.1.10	Correlação entre o termômetro TER2 e o fissurômetro FIS4 .....	88
5.1.11	Correlação entre o termômetro TER2 e o fissurômetro FIS7 .....	91
5.1.12	Correlação entre o termômetro TER1 e o termômetro TER2 .....	94
5.1.13	Correlação entre o fissurômetro FIS3 e o fissurômetro FIS4 .....	97
5.1.14	Correlação entre o fissurômetro FIS3 e o fissurômetro FIS7 .....	100
5.1.15	Correlação entre o fissurômetro FIS4 e o fissurômetro FIS7 .....	103
5.2.	CORRELAÇÕES ENTRE NÍVEL DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO (NA) E INSTRUMENTOS .....	106
5.2.1	Correlação entre o NA do reservatório e o termômetro TER2 .....	106
5.2.2	Correlação entre o NA do reservatório e o medidor de vazão MVZ6 .....	109
5.3.	PROPOSTA DE FERRAMENTA DE CONTROLE E MONITORAMENTO DA FISSURA DO BLOCO B-11 .....	112
5.4.	PROPOSTA DE PROCESSO DE MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO DAS FISSURAS TÉRMICAS EM BARRAGENS DE CONCRETO GRAVIDADE .....	120
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>123</b>
6.1.	CONCLUSÕES .....	123
6.1.1	Conclusões quanto aos objetivos da pesquisa .....	123

6.1.2	Conclusões quanto ao estudo de caso .....	124
6.1.3	Conclusões quanto à proposta de processo de monitoramento de fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade .....	128
6.2.	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	128
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>130</b>



## 1. INTRODUÇÃO

As barragens são obras de engenharia fundamentais ao desenvolvimento, pois possibilitam o armazenamento de água, principalmente, para fins de consumo (humano ou animal), irrigação, geração de energia elétrica, entre outros. Entretanto estas estruturas estão associadas a um potencial de risco significativamente alto, pois sua ruptura implica em consequências catastróficas às regiões do entorno.

A preocupação em evitar desastres impulsionou a criação de legislação, que no caso do Brasil entrou em vigor com a Lei nº 12.334/2010 (BRASIL, 2010), a qual estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e tem como objetivos promover a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos e reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências, entre outros. Destaca-se, ainda, que um dos fundamentos da Lei nº 12.334/2010 é que o empreendedor<sup>1</sup> é o responsável legal pela segurança da barragem, cabendo-lhe o desenvolvimento de ações para garanti-la (BRASIL, 2010).

De maneira geral, a PNSB obriga os empreendedores a investirem na preservação de suas estruturas e o aprimoramento de seus sistemas de monitoramento, que proporcionem respostas mais rápidas e objetivas.

As barragens são obras que envolvem grandes preocupações ambientais, sociais e econômicas e exigem um controle rigoroso, com total inspeção e garantia da segurança, sendo que o desempenho das estruturas deve ser assegurado através de investigações das suas reais condições, a fim de eliminar qualquer possibilidade de acidentes por colapsos e rupturas (THOMÉ *et al.*, 2008).

O monitoramento de barragens é a principal ferramenta na avaliação de suas condições de segurança, o qual pode detectar variações, decorrentes a processos de envelhecimento e alterações ambientais, que possam vir a colocar em risco a durabilidade ou a estabilidade de estruturas (SARÉ *et al.*, 2006 e Vieira Junior *et al.*, 2006). O conhecimento do nível de segurança de uma estrutura é importante para a elaboração de um plano de ações no caso de ocorrência de alguma alteração significativa (SARÉ *et al.*, 2006).

---

<sup>1</sup> A Lei 12.334/2010 define como empreendedor o agente privado ou governamental com direito real sobre as terras onde se localizam a barragem e o reservatório ou que explore a barragem para benefício próprio ou da coletividade

Sarmiento e Molina (2004) afirmam que a evolução de situações relativamente comuns a serem solucionadas, para situações mais graves e, no seu limite, incontornáveis, deve-se, na maioria dos casos, à postergação ou a não adoção de providências evidenciadas pelo monitoramento das barragens.

De acordo com Balbi (2008), as inspeções visuais e a instrumentação são as principais ferramentas do monitoramento de barragens, que são complementares entre si. Enquanto a primeira constitui excelente instrumento de avaliação global do desempenho das estruturas, a segunda agrega informações pontuais, por vezes dificilmente detectadas pelo olho humano, por mais treinado que esse seja.

Os instrumentos de auscultação podem ser instalados durante a construção da barragem ou depois, quando já na fase de operação. Neste caso, servem para prover informações sobre mudanças operacionais ou de comportamento que possam impactar a segurança das estruturas, provendo um alarme quando um indicador de desempenho exceder os limites estabelecidos como aceitáveis (FUSARO, 2007).

De acordo com Balbi (2008), a definição dos valores de controle dos dados da instrumentação e de suas faixas de aceitação pode ser feita através de métodos determinísticos ou estatísticos. Enquanto os determinísticos levam em consideração a modelagem numérica da barragem, os estatísticos se baseiam na relação entre as medidas dos instrumentos e outras variáveis, como o nível do reservatório, período do ano ou medida de outros instrumentos.

Especificamente em barragens de concreto, as principais grandezas medidas pela instrumentação são deslocamentos absolutos e relativos; deslocamentos diferenciais entre blocos; recalque e subpressões na fundação; temperatura do concreto; vazões de drenagem e infiltração; dentre outros (ELETROBRÁS, 2003; SILVEIRA, 2012).

Dentre as manifestações patológicas em barragens de concreto destaca-se fissuração devido a efeitos térmicos, que está associado ao processo construtivo destas estruturas. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as tensões térmicas são afetadas pelo grau de restrição, que nestas estruturas é imposto pela fundação em rocha e pelas áreas adjacentes de concreto com diferentes temperaturas, e pela variação de temperatura, decorrente da hidratação do cimento.

## 1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A questão que motivou esta pesquisa foi: “É possível desenvolver um processo de monitoramento de manifestações patológicas em barragens de concreto gravidade, com base na análise dos dados de instrumentação e no estabelecimento de valores de controle?”

Para isso, foi desenvolvido um estudo de caso, de uma barragem que apresentava fissuras de origem térmica e possuía histórico de leituras da instrumentação, para determinar as correlações e definir os seus valores limites que traduzissem a condição de normalidade.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa foi propor um processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade, com base na análise dos dados de instrumentação e no estabelecimento de valores de controle.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos foram traçados os seguintes:

- Verificar a correlação entre a temperatura ambiente e o comportamento das fissuras térmicas (abertura e fechamento) da barragem de concreto gravidade;
- Verificar a correlação entre a temperatura ambiente e as vazões de percolação na galeria de drenagem da barragem de concreto gravidade;
- Verificar a correlação entre o comportamento das fissuras térmicas e as vazões de percolação na galeria de drenagem da barragem de concreto gravidade;
- Verificar a correlação entre o nível de água do reservatório e as vazões de percolação na galeria de drenagem da barragem de concreto gravidade;
- Determinar estatisticamente os tempos de resposta entre as leituras dos instrumentos;

- Determinar estatisticamente os valores limites de leitura que representam a condição de normalidade da estrutura;
- Propor uma ferramenta de monitoramento das fissuras térmicas de uma barragem de concreto gravidade, inclusive com um modelo de relatório gerencial;
- Propor um fluxograma de processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade.

### 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se estruturado em 7 (sete) capítulos, organizados conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1 – INTRODUÇÃO.
- Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:
  - Segurança de Barragens – apresenta-se uma descrição sobre algumas das principais ocorrências de ruptura de barragens e a revisão bibliográfica sobre os requisitos (documentos legislativos, normativos e guias) de segurança de barragens no mundo e no Brasil.
  - Monitoramento e avaliação da segurança da barragem - apresenta-se uma revisão bibliográfica a respeito de monitoramento e avaliação da segurança de barragem, destacando-se os sistemas de instrumentação.
  - Barragens de concreto gravidade – revisa temas referentes às barragens de concreto, durabilidade de estruturas de concreto e fissuração em barragens devido a efeitos térmicos.
- Capítulo 3 – MÉTODO DA PESQUISA – apresenta a caracterização da pesquisa, a unidade de análise e escolha do estudo de caso, bem como a visão geral da pesquisa, com o detalhamento dos critérios de coleta e preparação dos dados e do tratamento dos dados e análise dos resultados.
- Capítulo 4 – O ESTUDO DE CASO – FISSURA DO BLOCO B-11 DA BARRAGE DA UHE GJR – Apresenta detalhes sobre o estudo de caso desta pesquisa, compreendendo informações sobre a construção da barragem, identificação de fissuras, verificação da estabilidade da

estrutura com a fissura do bloco B-11, os tratamentos efetuados na fissura do bloco B-11, histórico do comportamento das vazões de percolação e dados na instrumentação complementar instalada na fissura do bloco B-11.

- Capítulo 5 – RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS – apresenta os resultados das análises realizadas, separados por pares de variáveis, seguidos da apresentação da proposta da ferramenta de monitoramento do estudo de caso e da proposta de processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade, em atendimento ao objetivo geral da pesquisa.
- Capítulo 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS – apresenta as conclusões em três aspectos: quanto aos objetivos da pesquisa; quanto ao estudo de caso; e quanto à proposta de processo de monitoramento de fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade. Também são apresentadas sugestões de trabalhos futuros.
- Capítulo 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para elaboração da revisão bibliográfica traçou-se estratégia de revisar três temas. O primeiro refere-se a Segurança de Barragens e envolve o relato dos principais acidentes com barragens e os requisitos (documentos legislativos, normativos e guias) de segurança de barragens no mundo e no Brasil. O segundo apresenta revisão a respeito do monitoramento e avaliação da segurança da barragem, com destaque à instrumentação de auscultação das estruturas. Por fim é apresentado sobre barragens de concreto gravidade, compreendendo definições sobre a durabilidade de estruturas de concreto e fissuração em barragens devido a efeitos térmicos.

### 2.1. SEGURANÇA DE BARRAGENS

#### 2.1.1 Ocorrências de ruptura de barragens

Diversas barragens no mundo já romperam, provocando danos ambientais, sociais e econômicos. Dentre as centenas de casos de ruptura ocorridos ao longo da história, alguns casos famosos de falhas ou operações críticas, envolvendo barragens de diferentes tipos e características, destacam-se:

- Barragem St. Francis, nos Estados Unidos, a 75 km de Los Angeles, cuja ruptura ocorreu em 12 de março de 1928, cerca de 2 anos após o enchimento do seu reservatório, provocando a morte de mais de 400 pessoas a jusante do barramento (OUTLAND, 1977, *apud* BRASIL, 2005);
- Barragem Baldwin Hills, nos Estados Unidos, que rompeu em 14 de dezembro de 1963, causando a morte de 5 pessoas e a destruição de 41 casas (JANSEN, 1980, *apud* BALBI, 2008);
- Barragem Teton, nos Estados Unidos, rompida em 5 de junho de 1976, durante seu primeiro enchimento, quando o reservatório estava quase cheio, ocasionando a morte de 11 pessoas (JANSEN, 1980, *apud* BALBI, 2008);
- Barragem Malpasset, no sudeste da França, no distrito de Cannes, em novembro de 1959, aproximadamente 4 anos após o enchimento do seu reservatório, causando a morte de 421 pessoas (JANSEN, 1980, *apud* BALBI, 2008);

- Barragem de Vajont, na Itália, a qual foi galgada por uma onda de 100 metros sobre a crista, causada por grandes deslizamentos de terra em seu reservatório, na noite de 9 de outubro de 1963, provocando a morte de cerca de 2.600 pessoas (JANSEN, 1980, *apud* BALBI, 2008);
- Barragem de Veja de Tera, que rompeu no dia 10 de janeiro de 1959, no noroeste da Espanha, causando a morte de 144 pessoas (JANSEN, 1980, *apud* BALBI, 2008);
- Barragem de Tour, rompida no dia 20 de outubro de 1982, na Espanha, provocando a morte de 12 pessoas (BERMEJO, 2006);
- Barragem de Pampulha, no Brasil, que rompeu em 20 de maio de 1954, sem registro de perdas de vidas humanas. No dia 16 de maio haviam sido observadas surgências a jusante da barragem, porém sem provocar alertas. Segundo estudos, a ruptura se deu por erosão interna (VARGAS *et al.*, 1955, *apud* BALBI, 2008);
- Barragem de Orós, no estado do Ceará, a qual foi galgada em 25 de março de 1960, provocando a morte de aproximadamente 1000 pessoas (JANSEN, 1980, *apud* BALBI, 2008);
- Barragens de Euclides da Cunha e Limoeiro, em São Paulo, que romperam por galgamento no dia 19 de janeiro de 1977, sem registro de perdas de vidas humanas (BALBI, 2008);
- Barragem de rejeitos da Mineração Rio Verde, que rompeu no dia 22 de junho de 2001, provocando a morte de 5 trabalhadores da mineração (HUAMANO, 2001, *apud* BRASIL, 2005);
- Barragem de rejeito da indústria de papel na fazenda Bom Destino, do Grupo Iberpar, no município de Cataguases (MG), no Brasil, que rompeu no dia 29 de março de 2003, liberando lixívia (seiva de eucalipto) no córrego do Cágado e rio Pomba, afetando propriedades rurais e áreas urbanas. Entretanto, não houve registro de perdas de vidas humanas (FLORESTAL CATAGUASES, 2003);
- Barragem Camará, no Brasil, situada no município de Alagoa Grande, no estado da Paraíba, rompida em 17 de junho de 2004, provocou a morte de 5 pessoas e mais três mil desabrigados (VALENCIO, 2006);
- Barragem São Francisco, da Mineração Rio Pomba, localizada na cidade de Miraf (MG), rompeu no dia 10 de janeiro de 2007, provocando o

desalojamento de mais de 765 moradores, porém sem registros de vítimas fatais decorrentes do acidente (BALBI, 2008).

- Barragem de Algodões, a 250 km de Teresina, no Piauí, rompeu no dia 27 de maio de 2009, provocando a morte de pelo menos 4 pessoas (CARVALHO e PARAJARA, 2009).

Apesar de reduzido, o risco de ruptura de uma barragem constitui uma realidade potencial para tais empreendimentos. De acordo com o Boletim 99 (ICOLD, 1995), a percentagem de ruptura de grandes barragens é de 2,2% para as barragens construídas antes de 1950 e de cerca de 0,5% para as construídas após esta data. A maior parte das rupturas, cerca de 70%, ocorreu com barragens nos seus primeiros 10 anos de operação e, mais especialmente, no primeiro ano após o comissionamento.

Em barragens de concreto, os problemas de fundação são a maior causa de ruptura, sendo que erosão interna e resistência ao cisalhamento insuficiente da fundação respondem por 21% das causas de ruptura cada um. No caso das barragens de terra e de enrocamento, a causa mais comum de ruptura é o *overtopping* (31% como causa principal e 18% como causa secundária), seguida por erosão interna do corpo da barragem (15%) e erosão interna da fundação (12%) (ICOLD, 1995).

### 2.1.2 Segurança de Barragens no mundo

A Tabela 1, publicada pela Comissão Mundial de Barragens (World Commission on Dams – WCD) a partir da compilação de dados do ICOLD e outras fontes, apresenta a distribuição de grandes barragens por país no mundo. Esses dados não representam a totalidade de barragens existentes em cada país, uma vez que parte dos registros é voluntária e também não estão consideradas as pequenas barragens (BALBI, 2008).

Segundo Balbi (2008), os países que se destacaram na construção de barragens também tiveram mais experiências negativas relacionadas a acidentes envolvendo essas estruturas. Os Estados Unidos são uma importante referência, já que possuem uma expressiva quantidade de barragens e casos de acidentes relatados e estudados, ao contrário de outros, como a China, que apresentam poucos registros oficiais.



Tabela 1 – Distribuição das grandes barragens por país no mundo

	País	Registro Mundial de Barragens do ICOLD de 1998	Outras fontes	Porcentagem do total de barragens	Porcentagem acumulativa
1	China	1855	22000	46,2	46,2
2	Estados Unidos	6375	6575	13,8	60,0
3	Índia	4011	4291	9,0	69,0
4	Japão	1077	2675	5,6	74,6
5	Espanha	1187	1196	2,5	77,1
6	Canadá	793	793	1,7	78,8
7	Coréia do Sul	765	765	1,6	80,4
8	Turquia	625	625	1,3	81,7
9	Brasil	594	594	1,2	82,9
10	França	569	569	1,2	84,1
11	África do Sul	539	539	1,1	85,2
12	México	537	537	1,1	86,3
13	Itália	524	524	1,1	87,4
14	Reino Unido	517	517	1,1	88,5
15	Austrália	486	486	1,0	89,5
16	Noruega	335	335	0,7	90,2
17	Alemanha	311	311	0,7	90,9
18	Albânia	306	306	0,6	91,5
19	Romênia	246	246	0,5	92,0
20	Zimbábwe	213	213	0,4	92,4
	Outros	3558	3558	7,0	100,0
	<b>Total</b>	<b>25423</b>	<b>47655</b>	<b>100</b>	

Fonte: WCD (2000)

De acordo com CBDB (1999), uma série de rupturas catastróficas, a partir da década de 50, levou diversos países a adotarem medidas que garantissem a segurança de suas barragens. Outros fatores corroboraram com o investimento de maiores esforços no âmbito de segurança de barragens, tais como: aumento nas dimensões das novas barragens e envelhecimento de uma quantidade apreciável de outras, bem como incremento na quantidade de barragens sendo construídas em países com pouca ou nenhuma experiência em engenharia de barragens.

Relacionado a estas medidas supracitadas, Jeon *et al.* (2009) apresentam um sistema de gerenciamento de segurança de barragens adotado na Coreia pela *Korea Water Resource Corporation* (KWATER), responsável pela manutenção e operação de 30 grandes barragens, que é constituído de dados das barragens e reservatórios, sistema de informações hidrológicas, sistema de inspeções de campo e gestão de dados, inclusive monitoramento sísmico, sistema de investigação *in loco* e avaliação das condições de segurança e sistema coletivo de informações.

Segundo Balbi (2008), na maioria dos países europeus, os requisitos de Segurança de Barragens estão bem estabelecidos. Os principais documentos legislativos, normativos e guias consultados dos países citados são relacionados no Apêndice 1.

A legislação relativa às barragens de qualquer país, geralmente, leva em consideração, para definição quanto à obrigatoriedade de elaboração de Planos de Ações Emergenciais, suas características estruturais e a sua capacidade de provocar danos ambientais, econômicos e à população a jusante. No Apêndice 2 são mostrados alguns dos critérios adotados mundialmente para definir quais barragens devem seguir a regulamentação vigente, com relação ao controle e segurança de suas estruturas e ao planejamento de emergência em caso de uma possível ruptura (BALBI, 2008).

### 2.1.3 Segurança de Barragens no Brasil

Com relação à legislação brasileira, especificamente no Estado de São Paulo, logo após os acidentes ocorridos com as barragens de Euclides da Cunha e Armando de Salles Oliveira, em 1977, foi emitido o Decreto nº 10752 dispoendo sobre segurança de barragens no Estado e recomendando auditorias técnicas permanentes. Entretanto, este decreto nunca foi implementado por falta de regulamento (CBDB, 1999).

Seguindo a tendência mundial da década de 70, o CBGB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens editou em 1979 e 1983 as “Diretrizes para a Inspeção e Avaliação da Segurança de Barragens em Operação”. Em 1986, editou também as “Recomendações para Formulação e Verificação de Critérios e Procedimentos de Barragens e Reservatórios” e, em 1996, “Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil”. Estes documentos serviram para batizar os procedimentos de segurança de organizações brasileiras (CBDB, 1999).

De acordo com CBDB (1999), em 1988 foi criado um grupo de trabalho pelo Ministério de Minas e Energia, através da Portaria nº 739, a fim de normalizar procedimentos preventivos e de manutenção voltados à segurança das barragens. O grupo concluiu um relatório em 1989 que, dentre outros aspectos importantes abordados, previa a instalação de um Cadastro Nacional de Barragens e a caracterização do potencial de risco de cada estrutura.

Em 1999 foi publicado, pelo Comitê Brasileiro de Barragens, o Guia Básico de Segurança de Barragens, o qual foi baseado nas Diretrizes para Segurança de Barragens da Associação Canadense de Barragens (Canadian Dam Safety Guidelines), segundo CBDB (1999). Posteriormente o Guia Básico serviu de bibliografia básica para o Ministério da Integração Nacional - MI elaborar o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, publicado em julho de 2002, com o objetivo principal de estabelecer parâmetros e um roteiro básico de orientação aos proprietários de barragens (BRASIL, 2002).

No Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (BRASIL, 2002), consta a orientação de que todas as barragens devem ser inspecionadas periodicamente para detectar eventuais deteriorações e recomendar ações remediáveis. Neste, são previstos quatro tipos de inspeções, são elas: de rotina, formais, especiais e de emergência, cuja frequência dependeria da classificação da barragem e seu potencial de danos provocados por eventos ou pela ocorrência de deficiências severas. Também consta que as eventuais obras de reparo ou de manutenção recomendadas nas inspeções devem ser implementadas com a máxima brevidade possível, bem como as providências e recomendações devem ser registradas.

Também no Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (BRASIL, 2002) orienta-se que toda barragem deve ser instrumentada, de acordo com seu porte e riscos associados, com a realização das leituras periodicamente. E ainda, que todos os instrumentos devem possuir valores calculados de controle ou limites. Os instrumentos, juntamente a qualquer sistema de aquisição, processamento e transmissão dos dados, devem ser mantidos em boas condições de funcionamento.

Quanto à manutenção de barragens em operação, o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (BRASIL, 2002) orienta que programas de manutenção devem ser organizados e avaliados, no mínimo, anualmente e que devem estar disponíveis uma descrição das regras de manutenção, de procedimentos, de registros e de responsabilidades para as barragens, estruturas e equipamentos associados (inclusive instrumentação), essenciais para a segurança da barragem. E ainda, que as equipes de operação e manutenção das barragens sejam treinadas e devem dispor de um plano de procedimentos de emergência para a orientação em casos extremos, os quais devem contemplar no mínimo: “como proceder em resposta aos alertas da instrumentação; o que fazer para manter a população mobilizada; e quais providências a serem tomadas contra danos patrimoniais e ambientais”.

Segundo Oliveira (2010), em 2003 criou-se um grupo de trabalho na Câmara Técnica de análise de projetos do CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos, para avaliar o Projeto de Lei nº 1.181, o qual propunha uma Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB. O grupo elaborou um relatório que, após aprovado pelo CNRH, foi encaminhado para a Câmara dos Deputados na forma de um Substitutivo de Projeto de Lei. Em 2009 o Substitutivo mencionado sofreu modificações e transformou-se no Projeto de Lei nº 168, porém apenas em 04/03/2010 teve seu texto final aprovado.

Finalmente, em 20 de setembro de 2010, entrou em vigor a Lei nº 12.334/2010, a qual estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e tem como objetivos promover a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos e reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências, entre outros. De acordo com o parágrafo único do art. 1º, esta legislação aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características (BRASIL, 2010):

- I – altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 m (quinze metros);
- II – capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m<sup>3</sup> (três milhões de metros cúbicos);
- III – reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- IV – categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido em artigo específico da lei.

Silva e Possan (2012) afirmam que a lei 12.334/2010 procurou englobar todas as barragens independentes da altura, pois barragens de pequenas alturas podem apresentar algumas características, como construção em feições geológicas desfavoráveis, risco potencial alto na ocorrência de ruína, etc., que as fazem também significativas.

Destaca-se que um dos fundamentos da Lei nº 12.334/2010 é que o empreendedor é o responsável legal pela segurança da barragem, cabendo-lhe o desenvolvimento de ações para garanti-la.

## 2.2. MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE BARRAGEM

Segundo Balbi *et al.* (2012), para evitar acidentes com barragens, que podem ser catastróficos e atingir centenas de quilômetros ao longo do vale a jusante, deve-se procurar promover a segurança das barragens atuando em dois níveis: a gestão em exploração normal e a gestão em situação de emergência. O primeiro refere-se às atividades de manutenção, inspeção e observação de rotina da barragem e o segundo refere-se à definição e à mobilização de meios materiais e de recursos técnicos e humanos especiais necessários à gestão da crise e à minimização de danos na eventualidade da concretização de um acidente.

Em outras palavras, o primeiro refere-se ao monitoramento da barragem e o segundo ao Plano de Ações Emergenciais.

Focando-se no primeiro deles, de acordo com Balbi (2008), as inspeções visuais e a instrumentação são as principais ferramentas do monitoramento de barragens, que são complementares entre si. Enquanto a primeira constitui excelente instrumento de avaliação global do desempenho das estruturas, a segunda agrega informações pontuais, por vezes dificilmente detectadas pelo olho humano, por mais capacitado que esse seja.

Especificamente em barragens de concreto, Portella *et al.* (2012) indicam que a inspeção visual é uma técnica usada para investigar problemas em superfícies de concreto, tais como fissuras, eflorescências, desagregação e lixiviação, embora deva-se ter cuidado para evitar erros devido a especiais patologias de concreto.

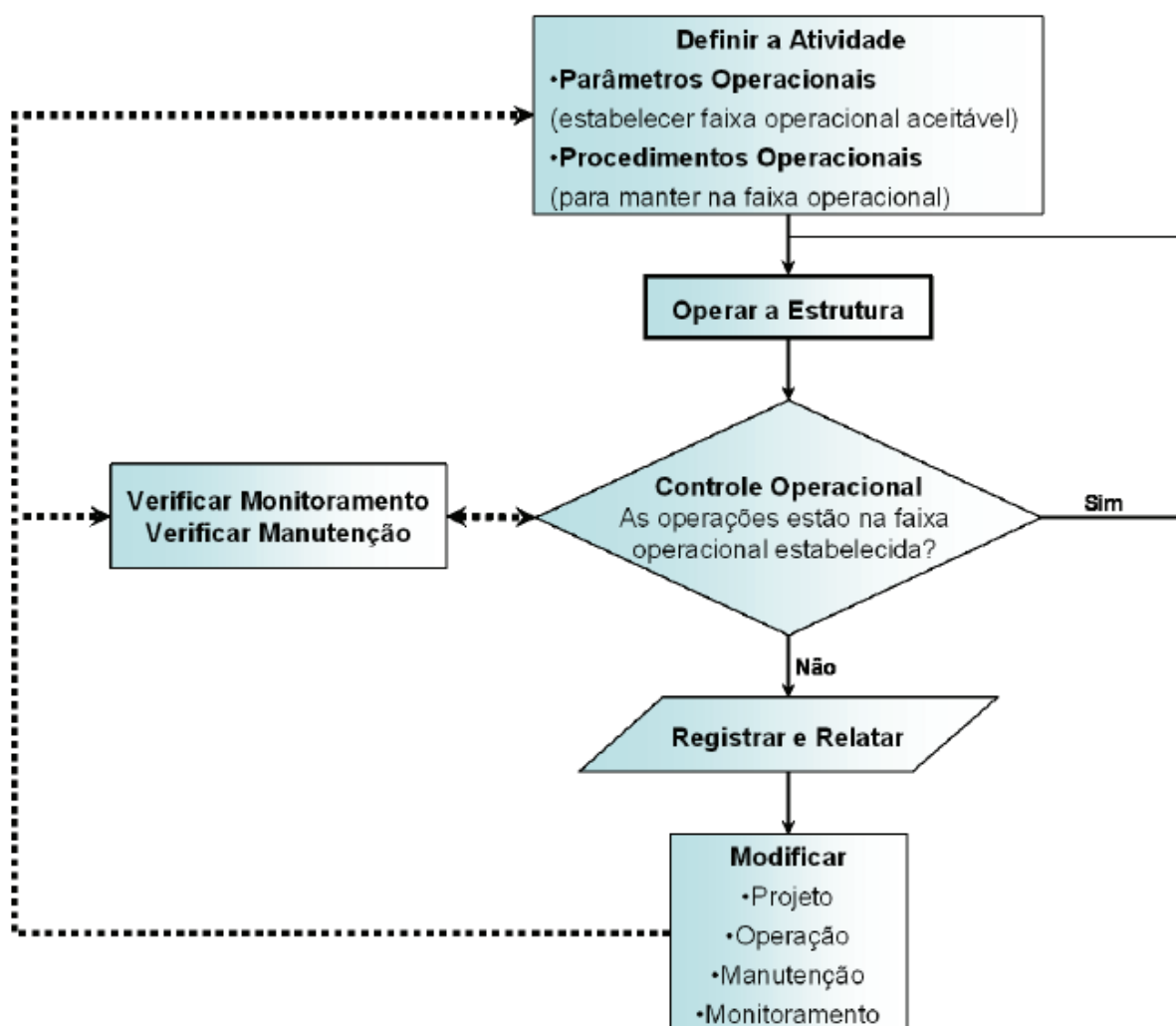
O objetivo final do monitoramento é fornecer elementos para a avaliação do comportamento de barragens que, segundo ICOLD (1992, *apud* BALBI, 2008), devem obedecer os seguintes procedimentos:

- Análise dos documentos de projeto;
- Recuperação e leitura de todos os documentos relacionados com a construção da barragem e seu comissionamento;
- Análise das deteriorações detectadas através de inspeções visuais durante os anos de operação;
- Análise das informações coletadas pela instrumentação;
- Estudos dos possíveis modos e mecanismos de falha das estruturas; e
- Reavaliação da segurança da estrutura admitida como 'nova', tendo em mente a geometria atual, as características dos materiais,

descontinuidades existentes e dados reais coletados pela instrumentação, utilizando critérios de projeto e ferramentas computacionais atuais.

Para Balbi (2008), a fim de tornar o ciclo de avaliação completo, é conveniente acrescentar a esses procedimentos a definição dos níveis de segurança da barragem em função dos indicadores investigados no processo de avaliação do comportamento.

A organização MINING ASSOCIATION OF CANADA desenvolveu um guia (MAC, 2005) para fornecer orientação para elaboração de manuais com os procedimentos básicos para a operação segura, manutenção e monitoramento de estruturas de rejeitos e de gestão da água. Apresenta fluxogramas típicos de operação e de monitoramento de estruturas, os quais são apresentados na Figura 1 e na Figura 2, respectivamente.



**Figura 1** – Fluxograma típico de operação de estruturas  
Fonte: OLIVEIRA, 2010 (adaptado de MAC, 2005)

Com base no fluxograma da Figura 1, segundo Oliveira (2010), após a definição de uma atividade, define-se a faixa operacional aceitável, ou seja, os limites da operação, os quais estão associados aos parâmetros operacionais. Os procedimentos operacionais objetivam manter a operação dentro nos limites estabelecidos e, para isso, torna-se necessário controlar a operação. O controle operacional busca verificar se as operações estão mantidas dentro da faixa operativa ou dos limites operacionais.

Caso a operação esteja nos limites estabelecidos, o processo operacional prossegue e, caso a operação esteja fora dos limites operacionais definidos, registra-se e relata-se a ocorrência. Em seguida, analisa-se o fato por meio da avaliação do projeto, da operação, da manutenção e do monitoramento e verifica-se a necessidade da implementação de modificações. O importante é que cada anomalia operacional detectada seja rigorosamente avaliada e uma ação adequada seja introduzida no processo (Oliveira, 2010).

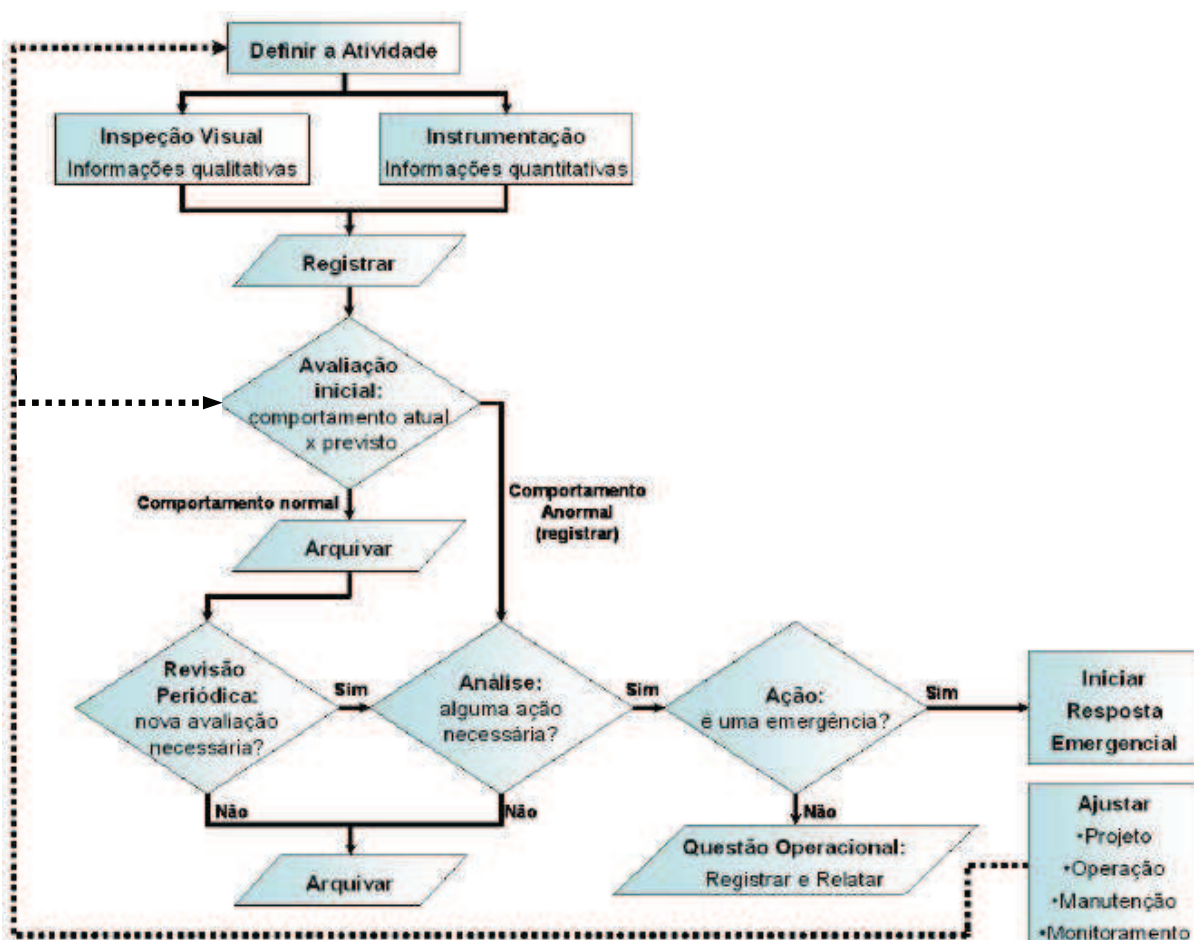


Figura 2 – Fluxograma típico de monitoramento de estruturas  
Fonte: OLIVEIRA, 2010 (adaptado de MAC, 2005)

Analogamente ao fluxograma de operação, no fluxograma de monitoramento (Figura 2) impõe-se estabelecer a definição da atividade e os parâmetros que determinam o seu comportamento normal (neste caso qualitativos e quantitativos). Verificações do comportamento da estrutura são conduzidas para que ações de emergência possam ser tomadas no caso de possíveis desvios, procedendo-se aos ajustes que se tornem necessários.

Oliveira (2010) informa, em termo gerais, os seguintes objetivos que envolvem as atividades de monitoramento de barragem de rejeito:

- Identificação das condições destoantes e/ou conflitantes com as do desempenho esperado;
- Análise dessas condições, visando o reconhecimento de situações que possam vir a se estabelecer e que possam contribuir para um comportamento indesejado da estrutura;
- Possibilitar o estabelecimento de ações que venham a reverter a tendência observada em determinado comportamento;
- Estabelecer mecanismos de implementação de procedimentos emergenciais de resposta.

Todos estes objetivos supracitados também são estendidos às barragens de gestão da água.

### 2.2.1 Instrumentação de barragens

Segundo ICOLD (2000), as principais atividades envolvidas em monitoramento de barragens incluem:

- Obter medições com instrumentos;
- Verificar dados;
- Processar e analisar dados;
- Interpretar e relatar os resultados.

O principal objetivo da instrumentação de barragens é ser fonte de informações sobre o comportamento das estruturas de uma barragem, contribuindo para o entendimento do seu desempenho e para a manutenção da sua segurança (FUSARO, 2007).

ICOLD (1989, *apud* Fusaro, 2007) caracteriza a instrumentação, como um meio de fazer medidas da aferição do comportamento de uma barragem, agregando



valor às avaliações da segurança que seriam feitas apenas com base nas informações provenientes das inspeções visuais.

A instrumentação permite tratar informações de locais que não são inspecionáveis ou onde a mudança de comportamento ocorre numa escala tão pequena que não é possível perceber visualmente e pode ser separada em dois grandes grupos. O primeiro é a instrumentação de auscultação de barragens, cuja finalidade principal é monitorar mecanismos estruturais de falhas possíveis de ocorrer e os parâmetros efetivamente necessários ao acompanhamento do desempenho das estruturas ao longo da sua vida útil. O segundo grupo diz respeito a eventos externos, de origem sísmica ou hidrometeorológica (BALBI, 2008).

A instrumentação completa engloba medições de deslocamentos, deformações, tensões, pressões, cargas nos membros estruturais, percolação e drenagem junto com fatores ambientais que afetam o comportamento da barragem tais como temperatura, nível do reservatório e precipitação (CARVALHO e ROMANEL, 2007).

De forma geral, quando instalados em barragens novas, os instrumentos visam checar considerações de projeto e parâmetros de construção, bem como quantificar o desempenho inicial e aferir comportamentos a longo prazo. Enquanto que sistemas de medição instalados em barragens em operação geralmente servem para prover informações sobre mudanças operacionais ou de comportamento que possam impactar a segurança das estruturas (FUSARO, 2007).

Conforme indicado por Fusaro (2007), durante a fase de operação, os sistemas de instrumentação podem ser instalados para prover um alarme quando um indicador de desempenho exceder os limites estabelecidos como aceitáveis, constituindo uma ferramenta eficaz na identificação de possíveis situações de risco à segurança das estruturas.

A análise minuciosa dos dados dos instrumentos de auscultação exige a combinação de conhecimentos de engenharia com matemática e estatística, bem como experiência prévia do engenheiro ou técnico responsável pela interpretação destes dados, consumindo muito tempo e muitas vezes inviabilizando o cumprimento rápido desta tarefa. Por esta razão, o uso de técnicas e ferramentas computacionais, que auxiliem o tomador de decisões, é relevante (SILVA NETO *et al.*, 2010).

De acordo com Balbi (2008), a definição dos valores de controle dos dados da instrumentação e de suas faixas de aceitação pode ser feita através de métodos

determinísticos ou estatísticos. Os primeiros levam em consideração a modelagem numérica da barragem, possibilitando a avaliação do seu comportamento estrutural, através de comparações entre grandezas medidas *in situ* e aquelas fornecidas pelos modelos matemáticos de análise. A análise estatística se baseia na relação entre as medidas dos instrumentos e outras variáveis, como o nível do reservatório, período do ano ou medida de outros instrumentos. Podem ser aplicados procedimentos de correlação usando as séries temporais obtidas da leitura da instrumentação e representativas do comportamento da barragem após vários ciclos de leitura.

Segundo Silva Neto *et al.* (2010), conhecer o relacionamento entre os instrumentos de uma barragem é de suma importância, pois, se sabendo destas relações, ao ocorrer uma anomalia num determinado instrumento em leituras futuras, os outros instrumentos relacionados deverão ser analisados para confirmar a anomalia, fazendo com que as medidas cabíveis sejam tomadas pela empresa.

Os métodos determinísticos têm maior aplicação nas fases de enchimento do reservatório e no monitoramento a curto prazo da fase de operação. Cada instrumento deve possuir seus valores esperados pré-estabelecidos, considerando os valores que podem colocar as estruturas em perigo antes do início de enchimento do reservatório. Geralmente são fornecidos pelas equipes de projeto da obra, embora existam casos em que são desconhecidos ou que, dadas a intervenções no barramento, a mudanças ambientais ou à evolução dos critérios de projeto, torna-se necessário recalculá-los (BALBI, 2008).

Segundo Balbi (2008), os métodos estatísticos de avaliação da segurança da barragem estão associados, basicamente, ao monitoramento de longo prazo realizado na fase de operação, já que busca averiguar principalmente mudanças de tendências no comportamento das estruturas, permitindo detectar precocemente alguns problemas. O fundamental é que os instrumentos possuam níveis de controle estabelecidos de forma adequada ao tipo de monitoramento desejado para permitir análises técnicas mais rápidas e confiáveis.

De acordo com Sortis e Paoliani (2007), as vantagens do método estatístico consistem na simplicidade de formulação, velocidade de execução e disponibilidade de diferentes análises de correlação entre parâmetros independentes e dependentes. Enquanto que a principal desvantagem é que coeficientes estatísticos não proporcionam significados físicos, o que impede o engenheiro de identificar as causas de respostas estruturais inesperadas. Sendo assim, Sortis e Paoliani (2006)

sugerem analisar os dados de instrumentação coletados usando também técnicas de identificação estrutural, a fim de correlacionar o comportamento da barragem com parâmetros intrínsecos, tais como tamanho da estrutura, condições de controle e propriedades elásticas.

Para definição dos valores de controle a partir dos dados de instrumentação, também é possível adotar a técnica de redes neurais temporais, como apresentado por Carvalho e Romanel (2007) e também por Mata (2011).

De acordo com ICOLD (2000), a tendência dos novos meios tecnológicos para uma melhor compreensão e um melhor controle da segurança de barragens é a aplicação das técnicas de Inteligência Artificial, sendo as mais correntes os sistemas especialistas e os sistemas de redes neurais.

Os sistemas especialistas dependem da existência de conhecimento especializado a respeito do comportamento do sistema em questão. Uma característica-chave destes sistemas é dizer ao usuário 'como' uma conclusão foi atingida, indicando os dados e a série de regras que conduziram a máquina a esta conclusão. Já os sistemas de rede neural, ao contrário, não necessitam de nenhuma compreensão do comportamento do sistema em questão. Apoiam-se simplesmente sobre uma capacidade de comparar padrões, sem necessitar de um modelo fundamental para explicar como ou por que o sistema produz um resultado particular proveniente do dado de entrada em questão (FUSARO, 2007).

Para ICOLD (2000), em caso de monitoramento a curto prazo, caracterizado com o propósito de detectar mudanças (anomalias) no comportamento e condições da barragem e reservatório, o método de processamento mais simples é muitas vezes suficiente, consistindo na representação gráfica dos resultados versus tempo ou nível do reservatório, a fim de comparar as leituras previstas e realizadas. Também indica que a análise estatística dos dados (regressão simples ou múltipla, média móvel, correlações) é também utilizada e geralmente associada com valores limites para disparar alarmes.

Já para monitoramento a longo prazo, a fim de detectar mudanças (possíveis efeitos de deterioração) nas condições e comportamento da barragem e reservatório para realizar a avaliação integral da segurança das estruturas, ICOLD (2000) sugere a adoção de métodos determinísticos combinados às análises dos dados dos instrumentos baseado em métodos estatísticos.

Para os parâmetros medidos pela instrumentação de barragens, usualmente adotam-se três níveis de operação: normal, atenção e emergência. Estes níveis de segurança orientam os envolvidos na definição do grau de perigo em situações de emergências auxiliando nas tomadas de decisão e indicando os passos a serem seguidos após a identificação de uma situação que possa colocar em risco a segurança da barragem (BALBI, 2008).

A análise dos dados da instrumentação envolve a correlação dos valores medidos com os carregamentos, determinação de tendências de variação e cuidadosa comparação dos valores medidos com aqueles previstos teoricamente ou experimentalmente. Para que essa análise seja possível, as informações completas devem estar disponíveis em um formato tal que facilite a sua interpretação. Este formato pode ser uma tabela ou gráfico, se possível correlacionando as medidas com parâmetros que possam influenciá-las, como nível de montante, de jusante, temperatura ambiente e progresso da construção. Além disso, toda a informação sobre os critérios e considerações de projeto e sobre o método de estabelecimento dos 'limites de tolerância' teóricos pré-estabelecidos para os parâmetros monitorados devem estar disponíveis (FUSARO, 2007).

Segundo Fusaro (2007), os dados da instrumentação devem ser analisados sob duas óticas: primeiro, em função do tempo para identificar mudanças de tendências; segundo, dentro do contexto do comportamento esperado em relação aos critérios de projeto. Sob qualquer uma destas duas óticas, para se proceder a esta análise deve-se ter em mente que ICOLD (1989, *apud* FUSARO, 2007):

- Existe um *time-lag* entre um fenômeno físico, como variação do nível d'água do reservatório, por exemplo, e a resposta dada pelo instrumento;
- Escalas distorcidas para a representação gráfica dos dados coletados podem levar a interpretações e conclusões também distorcidas;
- Variações bruscas e/ou inesperadas devem ser correlacionadas criteriosamente com as informações relativas à construção e à operação da barragem, de forma a proporcionar interpretações lógicas para estes registros coletados;
- As conclusões devem ser baseadas em tendências estabelecidas ao longo de um período de tempo razoável das observações;

- Correlações com diferentes tipos de dados devem ser estabelecidas de forma a garantir confiabilidade aos processos de monitoramento;
- As limitações inerentes a cada instrumento devem ser previamente conhecidas, de forma a se evitar tentativas improdutivas de se avaliar dados cuja magnitude está dentro da margem de erro do instrumento utilizado;
- Os limites aceitáveis para os dados da instrumentação devem ser estabelecidos na fase de projeto, antes do início do enchimento do reservatório (as estruturas e fundações sendo capazes de suportar certas magnitudes de deslocamento, pressão, etc.), evitando-se tais proposições baseadas nos registros posteriores indicados pela instrumentação;
- A ocorrência de dados da instrumentação em desacordo com os valores previstos não implica necessariamente a existência de um problema; por outro lado, também é verdade que mesmo dados inseridos dentro das faixas admissíveis dos instrumentos não implicam necessariamente que não existam problemas.

### 2.2.2 Instrumentos de auscultação de barragens de concreto

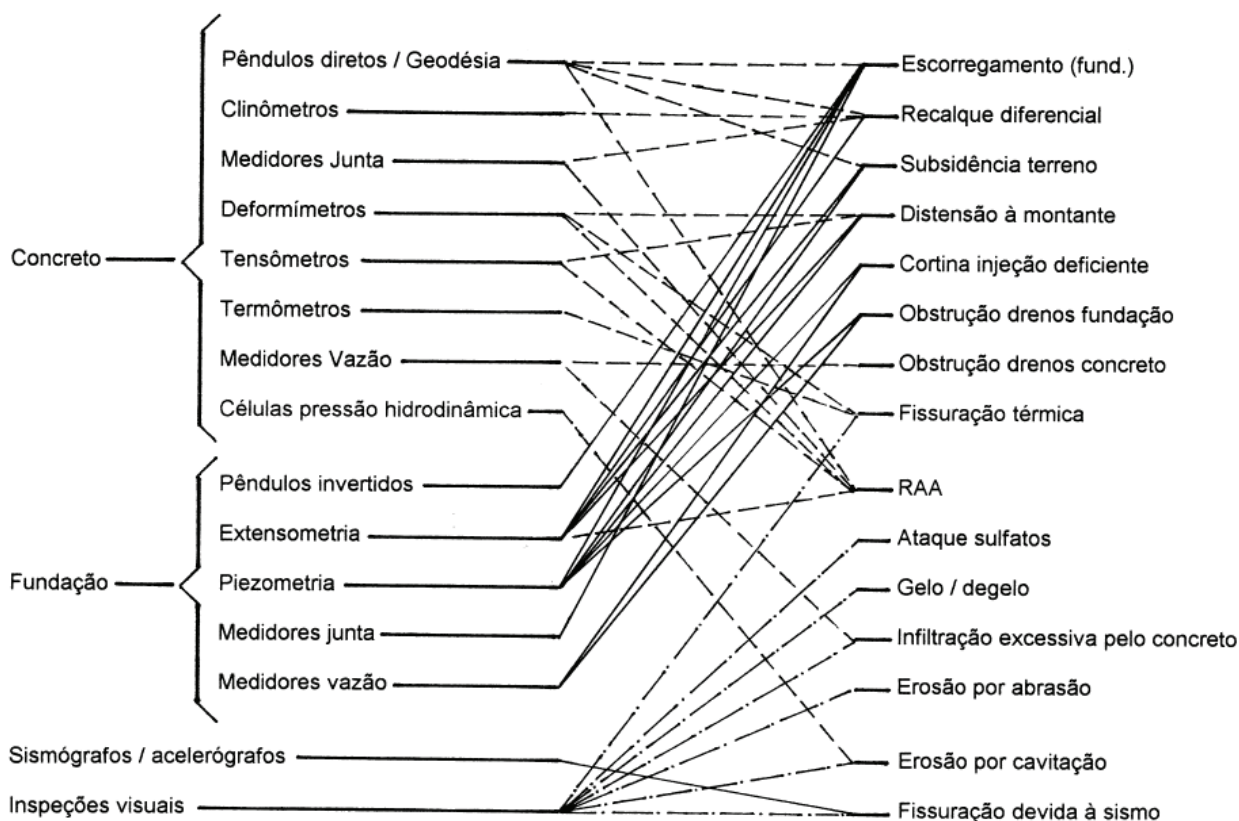
Em barragens de concreto, as principais grandezas medidas pela instrumentação são (ELETROBRÁS, 2003; SILVEIRA, 2012):

- Deslocamentos absolutos e relativos;
- Deslocamentos diferenciais entre blocos;
- Recalque da fundação;
- Temperatura do concreto;
- Tensões na armadura (se existente);
- Carga nos cabos de protensão (se existente);
- Subpressões na fundação;
- Abertura de juntas entre blocos; e
- Vazões de drenagem e infiltração.

Medidas de variações de níveis d'água a montante e a jusante das estruturas, precipitação pluviométrica e de temperatura ambiente na área do projeto também devem ser efetuadas, pois serão de grande utilidade para auxiliar na análise e interpretação dos resultados da instrumentação (ELETROBRÁS, 2003). Segundo

Mata *et al.* (2013), as reações na estrutura de barragem de concreto são consequência da combinação dos efeitos das cargas principais, principalmente das cargas hidrostáticas e variações de temperatura.

Eletrobrás (2003) também relaciona os principais instrumentos e suas grandezas medidas, conforme apresentado na Figura 3.



**Figura 3 – Instrumentos de barragens de concreto**  
Fonte: Eletrobrás (2003)

Segundo Moser (2006) estão disponíveis e utilizados diversos sistemas de instrumentação de barragens, dos quais destacam-se:

- Sistema de medição por princípio elétrico;
- Sistema de medição por corda vibrante;
- Sistema de instrumentação por medição topográfica e ou geodésica;
- Sistema de instrumentação por medição direta; e
- Sistema de instrumentação por fibra ótica.

O princípio, especificamente, do sensor do sistema por corda vibrante, que é o utilizado no estudo de caso desta pesquisa, é calcular um parâmetro físico através da medição da mudança na frequência de uma corda vibrante esticada em um corpo

de uma estrutura que se deforma com ou pela quantidade a ser medida (CHOQUET *et al.*, 2002).

Segundo Choquet *et al.* (2002), um determinado comprimento de corda de aço de alta resistência é firmemente preso em suas pontas e tensionado, assim ficando livre para vibrar em sua frequência natural. Como uma corda de violão, a frequência de vibração varia com a tensão na corda e também com o pequeno movimento relativo entre os dois blocos finais. A corda possui uma bobina elétrica colocada em seu ponto médio. A vibração na corda induz na bobina de arranque uma corrente alternada de frequência idêntica à frequência de vibração da corda. O sinal da frequência pode ser transmitido ao longo de cabos condutores e visualizado por um leitor portátil ou monitorado por um sistema de aquisição de dados.

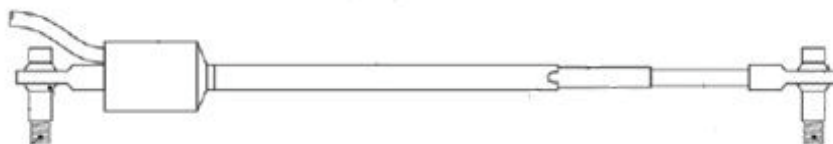
De acordo com Choquet *et al.* (2002), estes instrumentos são particularmente conhecidos por dar uma performance superior em aplicações geotécnicas, onde a credibilidade para um longo período e a imunidade do sinal a interferências elétricas é de importância primordial.

A seguir apresenta-se uma breve descrição sobre alguns dos principais instrumentos aplicados em barragens de concreto e que foram utilizados nesta pesquisa.

#### Fissurômetro

O fissurômetro (*crack meter*) é um instrumento concebido para medir o movimento transversalmente as juntas, como juntas de construção em prédios, pontes, oleodutos, barragens, entre outros; fissuras tensionais em solos; e juntas de rochas e concreto (GEOKON, 2013) (Figura 4).

Nesta pesquisa este instrumento foi instalado em fissura, com a função de medir sua abertura ou fechamento.



**Figura 4** – Fissurômetro  
Fonte: GEOKON (2013)

### Termômetro de superfície

Conforme definição de Silveira (2012), o termômetro de superfície destinado a medir a temperatura da água do reservatório, a montante, ou a temperatura do ar, a jusante, sendo instalados junto ao paramento (Figura 5).



**Figura 5** – Termômetro elétrico, conectado ao cabo de leitura  
Fonte: Silveira (2012)

### Medidores de vazão

Os medidores de vazão são instrumentos com a função de medir as vazões de drenagem através da fundação e as infiltrações através do concreto, podendo ser do tipo triangular (com ângulo de vértice igual a  $60^\circ$  ou  $90^\circ$ ) ou trapezoidal (SILVEIRA, 2012), conforme apresentado na Figura 6.



**Figura 6** – Medidores de vazão, sendo trapezoidal a esquerda e triangular ( $90^\circ$ ) a direita  
Fonte: Silveira (2012)



Baseado na altura da coluna d'água a montante da lâmina metálica é calculada a vazão, através de fórmula experimental, em função do ângulo da lâmina do instrumento ou do tipo de medidor (SILVEIRA, 2012).

Segundo Silveira (2012), as vazões de drenagem são influenciadas pelo nível do reservatório; pelo nível de jusante; pela sedimentação a montante; e por infiltrações através do concreto, que são afetadas pelas variações térmicas entre verão e inverno.

### 2.3. BARRAGENS DE CONCRETO GRAVIDADE

Por definição, segundo Bureau of Reclamation (1976), barragem de concreto gravidade é uma estrutura sólida de concreto, projetada e dimensionada para que seu peso próprio seja suficiente para garantir a estabilidade contra os efeitos de todas as forças impostas.

Segundo Marques Filho (2005), a estrutura está sujeita, principalmente, às solicitações geradas pelo peso próprio, empuxos de água, esforços gerados pela percolação de água, variações volumétricas derivadas da reação do cimento e da variação das condições ambientais, além de efeitos sísmicos.

A barragem de concreto gravidade pode ser constituída de concreto massa ou concreto compactado com rolo (CCR).

De acordo com ACI Committee 207 (2002), o ACI 116R define concreto massa como qualquer volume de concreto com dimensões grandes o suficiente para exigir que sejam tomadas medidas para lidar com a geração de calor e decorrente variação do volume, a fim de minimizar a ocorrência de fissuras.

Quanto ao CCR, o ACI 207.5R o define como o concreto que é compactado por meio de rolagem. O desenvolvimento de CCR tornou possível projetar uma barragem de gravidade ótima que tiraria proveito da excelente coesão do concreto massa, com a vantagem do rápido transporte e adensamento do material de preenchimento (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Segundo Gaspar *et al.* (2014), o fato do CCR ser executado em camadas (permitindo construção mais rápida) somente é possível por causa da menor quantidade de cimento utilizada, que faz com seja gerado menor calor de hidratação e conseqüentemente menores gradientes de temperatura no interior da estrutura, que devem ser controlados a fim de evitar fissuras.

### 2.3.1 Durabilidade de estruturas de concreto

É essencial que uma estrutura de concreto resista às condições para que foi projetada, sem deterioração, por muitos anos, ou seja, que seja durável.

De acordo com Neville (1982), a ausência de durabilidade pode ser causada pelo meio ambiente em que o concreto está exposto ou por causas internas do próprio concreto. As causas externas podem ser físicas, químicas ou mecânicas: devido às intempéries, ocorrência de temperaturas extremas, abrasão, ação eletroquímica e ataque por líquidos e gases, naturais ou artificiais. As causas internas podem ser a reação álcali-agregado, variações de volume devido às diferenças entre as propriedades térmicas do agregado e da pasta de cimento e, principalmente, a permeabilidade do concreto.

Neville (1982) destaca que a vulnerabilidade do concreto está diretamente relacionada com a permeabilidade do concreto, enfatizando que para um concreto ser durável deve ser impermeável.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), uma classificação dos processos de deterioração do concreto em nítidas e separadas categorias deve ser vista com certa precaução. Neste sentido, Mehta e Monteiro (2008) e Neville (1982) concordam que a deterioração do concreto é raramente devido a uma causa isolada.

Embora muitas vezes se sobreponham, as causas de deterioração em estruturas de concreto podem ser distintas entre físicas e químicas (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Mehta e Gerwick (1982, *apud* MEHTA E MONTEIRO, 2008) agruparam as causas físicas em duas categorias:

- Desgaste superficial ou perda de massa devido à abrasão, erosão e cavitação;
- Fissuração devido a gradientes normais de temperatura e umidade, cristalização de sais nos poros, carregamento estrutural e exposição a temperaturas extremas, como congelamento ou fogo.

De maneira similar, Mehta e Gerwick (1982, *apud* MEHTA E MONTEIRO, 2008) agruparam as causas químicas em três categorias:

- Hidrólise de componentes da pasta por água mole (da chuva ou da neve e do gelo derretidos);
- Reações de troca catiônica entre fluidos agressivos e a pasta de cimento;

- Reações químicas levando à formação de produtos expansivos, como no ataque por sulfato, reação álcali-agregado e corrosão da armadura no concreto.

Os ataques químicos no concreto manifestam-se através de efeitos físicos nocivos, como aumento da porosidade e permeabilidade, diminuição da resistência, fissuração, lascamento, perda de massa e deformações (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

### 2.3.2 Fissuração em barragens devido a efeitos térmicos

As principais causas de fissuras em barragens são: devido à retração plástica, ataque de sulfatos, reações álcali-agregado e similares, corrosão da armadura, assentamento do concreto, erros de acabamento, congelamento e degelo, concretagem em rampa, movimentos das formas, assentamento das fundações, fissuras geradas por carregamentos excessivos ou induzidas dinamicamente, formação de etringita tardia, alterações volumétricas gerada pelos fenômenos de origem térmica no concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008; MARQUES FILHO, 2005).

De acordo com Marques Filho (2005), tomados os cuidados com a caracterização dos materiais e com a adoção de processos construtivos que minimizem as falhas geradas na colocação e adensamento, ou devidas à deficiência de processo de cura, o controle da fissuração térmica passa a ser predominante nas preocupações de obras de concreto massa aplicada aos aproveitamentos hidráulicos (ARAÚJO e AWRUCH, 1998; MARQUES FILHO, 2005).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), projetistas e construtores de grandes barragens de concreto foram os primeiros a reconhecer a importância da elevação de temperatura no concreto devido ao calor de hidratação e subsequente retração e fissuração ocorridos no resfriamento.

Mehta e Monteiro (2008) comentam que fissuras paralelas ao eixo da barragem ameaçam sua estabilidade estrutural. Afirmam ainda que uma estrutura essencialmente livre de fissuras manterá um grande contato com as fundações e apoios laterais e comportar-se-á de acordo com o previsto pela distribuição de tensões de projeto.

Conforme definido por Mehta e Monteiro (2008), em geral, sólidos se expandem com o calor e se retraem com o resfriamento. Em estruturas massivas, a combinação do calor produzido pela hidratação do cimento e condições relativamente

baixas de dissipação de calor resulta em grande elevação da temperatura do concreto poucos dias após o lançamento, sendo que o resfriamento até a temperatura ambiente faz com que o concreto fissure (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Os principais fatores que afetam as tensões térmicas são (MEHTA E MONTEIRO, 2008):

- Grau de restrição: se um elemento está livre para se movimentar não apresentará desenvolvimento de tensão associado à deformação térmica com o resfriamento. No caso do concreto massa, este fica restringido externamente pela fundação em rocha e internamente pelas deformações diferenciais em diferentes áreas do concreto devido à presença de gradiente de temperatura.
- Variação de temperatura: a hidratação dos compostos de cimento envolve reações exotérmicas que geram calor e aumentam a temperatura do concreto massa, que por sua vez causa expansão, que sob restrição resulta em tensão de compressão. Esta variação de temperatura é o resultado da soma da temperatura de lançamento do concreto fresco com a elevação adiabática da temperatura, menos a temperatura ambiente e a queda de temperatura devido às perdas de calor.

O processo construtivo de barragens de concreto é complexo, tendo cronogramas de execução em geral superiores a 1 ano. Cada lançamento efetuado inicia, durante o processo de endurecimento, o desencadeamento da geração de calor pela reação de hidratação, recebendo restrições das camadas anteriores, cada uma com sua característica de resistência, módulo de elasticidade, coeficientes de fluência que variam com o tempo; e também, gerando continuamente calor. Como o crescimento da obra, inclui-se novas porções de concreto que geram calor, bem como as camadas anteriores continuam com calor gerado que necessita ser dissipado, em sistema cujas condições de contorno mudam continuamente devido à execução (MARQUES FILHO, 2005).

A deformação por retração térmica é determinada pela magnitude da queda de temperatura e pelo coeficiente de expansão térmica linear do concreto, que por sua vez é principalmente controlado pelo coeficiente de expansão térmica linear do agregado, que é o principal constituinte do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Os fatores que governam a fissuração do concreto são (MEHTA E MONTEIRO, 2008):

- Magnitude da deformação por retração, podendo ser contração térmica (deformação de retração associada ao resfriamento) e retração por secagem (deformação por retração associada à perda de umidade), este último é um fator de menos importância em estruturas maciças;
- Módulo de elasticidade: quanto menor o módulo de elasticidade, menor será a quantidade de tensão de tração elástica induzida para uma dada magnitude de retração;
- Fluência: quanto maior a fluência, maior será a quantidade de relaxação de tensão e menor a tensão de tração resultante; e
- Resistência à tração: quanto maior a resistência à tração, menor será o risco de tensão de tração exceder a resistência e fissurar o material.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), controlar a temperatura de lançamento do concreto é uma das melhores formas de se evitar a fissuração térmica.

Segundo Araújo e Awruch (1998), algumas medidas podem ser adotadas para reduzir a elevação de temperatura em barragens de concreto, como técnicas de pré-resfriamento, construção em sucessivas camadas finas e em intervalos mais longos e diminuição controlada de cimento e água no concreto. Os autores dão destaque às técnicas de pré-resfriamento, afirmando que os fatores de segurança em relação ao fissuramento são maiores quando utilizados estes processos.

Para Marques Filho (2005), o controle das variações volumétricas (devido aos efeitos térmicos) em barragens de concreto é feito através do controle da temperatura de lançamento, cura com pós-refrigeração, dosagens adequadas, limitação da altura das camadas e de seus intervalos de lançamento, e pelo dimensionamento de juntas de contração, que são complementadas por dispositivos de vedação e quando necessário chavetas ou almofadas para garantir o funcionamento estrutural conjunto dos diversos blocos.

### 3. MÉTODO DA PESQUISA

A seguir é apresentado o método de pesquisa adotado para a realização deste trabalho no intuito de alcançar o objetivo geral e os objetivos específicos propostos. O método de pesquisa engloba a caracterização e a visão geral da pesquisa, contemplando sua organização e as etapas de desenvolvimento, com a descrição dos procedimentos de coleta, preparação, seleção, tratamento e análise dos dados obtidos.

#### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Robson (2002) afirma que um projeto pode ser fixo ou flexível. A grande diferença é que no flexível é necessária uma repetitiva revisão de todos os aspectos durante a realização da pesquisa. Ou seja, no projeto flexível é possível que sejam alteradas no decorrer do trabalho as definições de coleta de dados e análise de dados ou até mesmo a questão problema e os objetivos da pesquisa. Nos projetos fixos é mais usual utilizar dados e estratégias quantitativas, enquanto que nos flexíveis dados e estratégias qualitativas. Baseado nisto, esta pesquisa enquadra-se como um projeto fixo.

Também de acordo com Robson (2002), a pesquisa pode ser classificada baseada em seus propósitos da seguinte forma:

- Exploratória: visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses;
- Descritiva: visa descrever as características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis;
- Explanatória: visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos;
- Emancipatória: desenvolvida utilizando-se a teoria da emancipação, mais aplicável a pesquisas sócio-políticas. Interage-se com a unidade de análise para compreender reações.

Esta pesquisa é classificada como explanatória, pois, de acordo com Robson (2002), explica-se pela pretensão de buscar uma explicação de uma situação ou problema, para explicar os padrões relacionados aos fenômenos sendo pesquisados e para identificar relações entre aspectos e fenômenos.

Com relação a natureza da pesquisa, Robson (2002) determina que pode ter dois tipos:

- Quantitativa: opiniões e informações são traduzidos em números para classificá-los e ordená-los;
- Qualitativa: utiliza-se método indutivo e considera a existência de uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito.

Esta pesquisa classifica-se de natureza quantitativa, utilizando-se de dados numéricos para resolver o problema de pesquisa.

Em relação à estratégia de pesquisa, Yin (2001) apresenta as condições para utilização de cada uma das cinco estratégias de pesquisa principais, conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 – Situações relevantes para diferentes estratégias de pesquisa**

<b>Estratégia</b>	<b>Forma da questão de pesquisa</b>	<b>Exige controle sobre eventos comportamentais?</b>	<b>Focaliza acontecimentos contemporâneos?</b>
Experimento	Como, por que	Sim	Sim
Levantamento	Quem, o que, onde, quantos, quanto	Não	Sim
Análise de arquivos	Quem, o que, onde, quantos, quanto	Não	Sim/não
Pesquisa histórica	Como, por que	Não	Não
Estudo de caso	Como, por que	Não	Sim

Fonte: YIN (2001)

Com o objetivo de propor um processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade, com base na análise dos dados de instrumentação e no estabelecimento de valores de controle, a estratégia adotada será o estudo de caso único, o qual reproduzirá as evidências quantitativas.

A escolha da estratégia de experimento para esta pesquisa justifica-se, pois, de acordo com Yin (2001):

- Responde a questão de como seria um processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto

gravidade, com base na análise dos dados de instrumentação e no estabelecimento de valores de controle;

- Não haverá controle do pesquisador sobre os eventos comportamentais; e
- Focaliza acontecimentos contemporâneos.

Contudo, a Tabela 3 apresenta o resumo da caracterização desta pesquisa.

**Tabela 3 – Caracterização da pesquisa**

<b>Tipo do Projeto</b>	<b>Propósito da Pesquisa</b>	<b>Natureza da pesquisa</b>	<b>Estratégia da Pesquisa</b>
Fixo	Exploratória	Quantitativa	Experimento
Flexível	Descritiva	Qualitativa	Levantamento
Flexível + Fixo	Explanatória		Análise de arquivos
	Emancipatória		Pesquisa histórica
			Estudo de caso

Fonte: Autora (2014)

### 3.2. UNIDADE DE ANÁLISE E ESCOLHA DO ESTUDO DE CASO

A unidade de análise desta pesquisa é uma fissura térmica em barragem de concreto gravidade, que possua instrumentação de auscultação instalada.

A escolha da fissura analisada levou em consideração o histórico de leituras dos instrumentos de monitoramento, visando séries históricas que permitem a determinação dos tempos de resposta entre os dados e seus níveis de correlação.

### 3.3. VISÃO GERAL DA PESQUISA

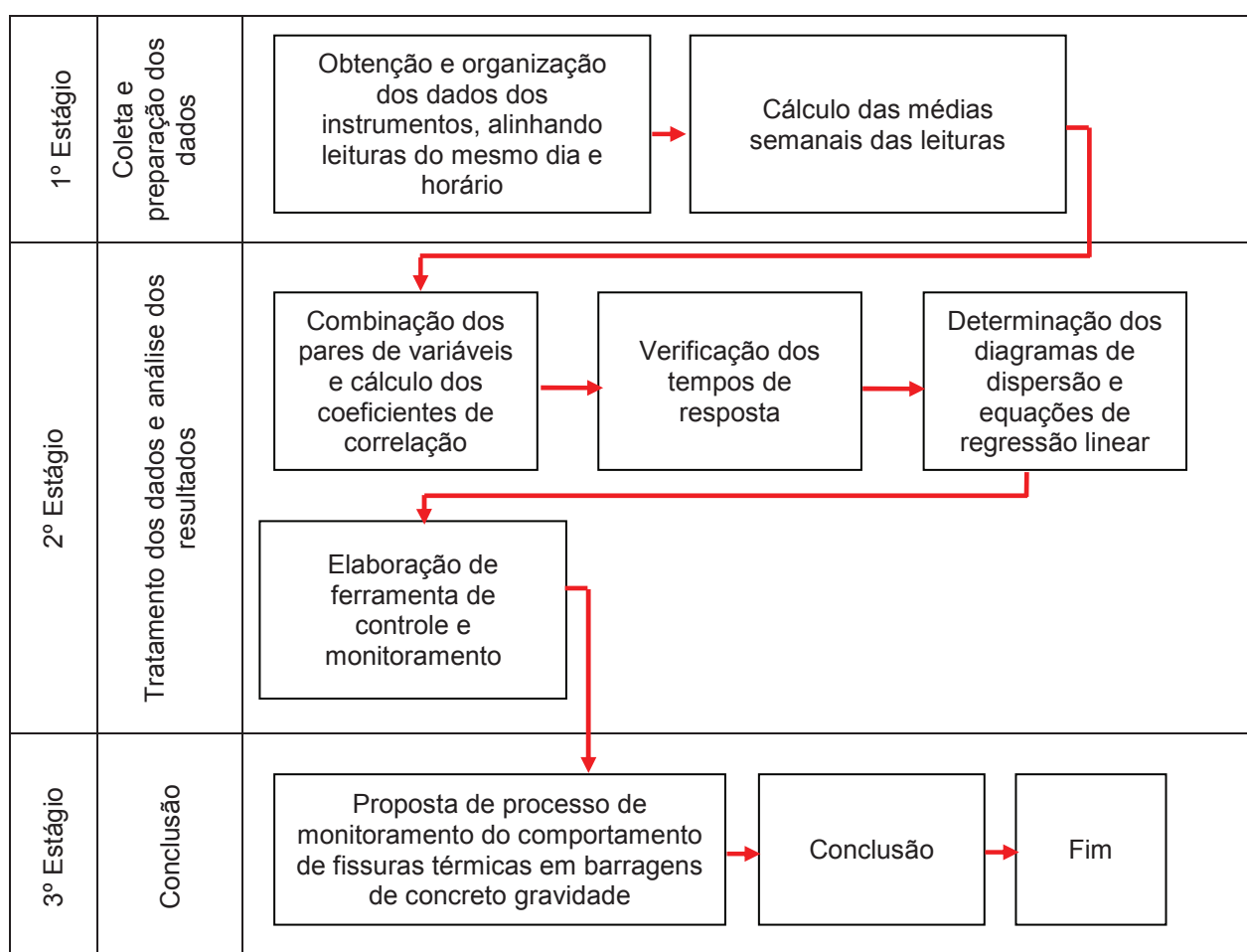
Após a realização da revisão bibliográfica, o desenvolvimento desta pesquisa ocorreu em três estágios, relacionados às leituras da instrumentação de auscultação instalada na fissura do estudo de caso: coleta e preparação dos dados; tratamento dos dados e análise dos resultados; e conclusão. A Figura 7 ilustra a estratégia de pesquisa através desses estágios, que são descritos detalhadamente nas subseções seguintes.



O tratamento dos dados baseia-se em procedimentos simples de cálculo de correlações, com a verificação da confiabilidade dos resultados adotando-se a distribuição *t de Student*.

Foram propostas correlações entre as séries temporais de leituras dos instrumentos de monitoramento da fissura, verificando-se os tempos de resposta entre eles e seus níveis de correlação. Com base nas melhores correlações foram estabelecidos os diagramas de dispersão e suas respectivas equações de regressão linear, que subsidiaram a proposta da ferramenta de controle e monitoramento desta fissura.

Adotando-se a mesma sistemática de cálculo, também foram verificadas as correlações entre as leituras de alguns instrumentos e o nível de água do reservatório, a montante da barragem do estudo de caso.



**Figura 7** – Estratégia do desenvolvimento da pesquisa  
Fonte: Autora (2014)

### 3.3.1 Primeiro estágio: coleta e preparação de dados

Como uma primeira preparação dos dados históricos dos instrumentos instalados na fissura do estudo de caso, procurou-se organizar as leituras de forma que cada linha da planilha apresentasse as leituras do mesmo dia e horário.

Como cada instrumento possuía uma periodicidade de leitura (horária, diária ou semanal), se só fossem consideradas as linhas da planilha que tivessem as leituras de todos os instrumentos, muitos dados seriam desconsiderados no estudo.

Além disso, conforme mencionado por Buzzi (2007), a dilatação do concreto componente da barragem, que depende da frente de propagação de calor ao longo do corpo da estrutura, está relacionada ao acúmulo de eventos ambientais. Ou seja, em uma parte interna da barragem, caso ocorra um dia de alta temperatura ambiente, não ocorrerá imediatamente tal dilatação. Buzzi (2007) ainda completa afirmando que a propagação do calor ocorre de maneira lenta e a dilatação resultante dependerá da quantidade de calor absorvida durante vários dias consecutivos.

Sendo assim, os dados foram reorganizados, calculando-se as médias das leituras por semana. Neste cálculo foram consideradas todas as leituras disponíveis de cada instrumento.

### 3.3.2 Segundo estágio: tratamento dos dados e análise dos resultados

Antes do cálculo das correlações, os dados foram agrupados em pares de variáveis (dois instrumentos ou um instrumento e o nível de água do reservatório), eliminando-se as linhas que apresentavam leitura de somente uma delas.

#### 3.3.2.1 Correlação entre duas variáveis

Após cada organização dos dados, foi adotado o coeficiente de correlação de Pearson para medir a intensidade do relacionamento existente entre duas variáveis aleatórias, que é definido através da Equação 3.1 (LIRA, 2004).

$$\rho(X, Y) = \frac{Cov[X, Y]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Sendo:

$\rho(X, Y)$  o coeficiente de correlação populacional entre X e Y;

$Cov[X, Y]$  a covariância entre duas variáveis aleatórias (X e Y); e  
 $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  os desvios padrões de x e y, respectivamente.

De acordo com Buzzi (2007), no denominador da equação 4.1, 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:

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

Baseado nisto, com o número n de amostras obtido das duas variáveis (X e Y), mediante o emprego da equação 3.2 (LIRA, 2004), calculou-se o coeficiente de correlação amostral ( $\hat{\rho}$ ) entre elas.

$$\hat{\rho}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Sendo:

$\hat{\rho}(X, Y)$  o coeficiente de correlação amostral entre X e Y;  
 $x_i$  uma leitura obtida do instrumento X;  
 $y_i$  uma leitura obtida do instrumento Y;  
 $\bar{x}$  a média aritmética das leituras do instrumento X; e  
 $\bar{y}$  a média das leituras obtidas do instrumento Y.

Cabe destacar que, de acordo com Lira (2004), o coeficiente de correlação de X e Y é o mesmo que Y e X.

Em seguida, para verificar se a correlação obtida entre X e Y difere significativamente de zero, foi realizado o teste de hipótese. Conforme indicado por Buzzi (2007), para realizar o teste de hipótese com respeito ao parâmetro  $\rho$  requer o conhecimento da distribuição amostral da estatística  $\hat{\rho}$ . Segundo Lira (2004), quando

$\rho = 0$  a forma da distribuição é simétrica e é possível testar a hipótese  $H_0: \rho = 0$  contra a hipótese  $H_1: \rho \neq 0$  através da distribuição *t de Student*, sendo que a estatística tem distribuição t com n-2 graus de liberdade.

Sendo assim, para o cálculo de t utilizou-se a equação 3.3 (LIRA, 2004).

$$t = \frac{\hat{\rho}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\hat{\rho}^2}} \sim t_{n-2} \quad (\text{Equação 3.3})$$

Sendo:

n            número de pares de observações.

A partir do t obtido calculou-se o valor-p, que é a significância de um teste, ou seja, a probabilidade máxima de rejeitar acidentalmente uma hipótese nula verdadeira (FUSARO, 2007). Um valor-p próximo de zero indica que a hipótese nula é falsa, enquanto que um valor-p próximo de 1 indica que não há evidências suficientes para se rejeitar a hipótese nula (DOWNING, 2000 *apud* FUSARO, 2007).

Segundo Fusaro (2007), normalmente considera-se um valor-p igual a 0,05 como patamar para avaliar a hipótese nula, o que significa 95% de confiança. Ou seja, se o valor-p obtido for inferior a 0,05 pode-se rejeitar a hipótese nula. Caso contrário, não há evidência para fazê-lo, o que significa que a hipótese nula é verdadeira.

Assim como feito por Fusaro (2007) e Buzzi (2007), nesta pesquisa também foi considerado o valor igual a 0,05 como patamar de avaliação do valor-p e consequentemente do teste de hipóteses. Sendo assim, se o valor-p obtido for inferior a 0,05, a correlação é considerada significativamente diferente de zero, o que indica forte correlação linear entre as variáveis.

O cálculo do valor-p nesta pesquisa foi realizado no MS Excel com a função DIST.T.BC (antiga DISTT), considerando-se as duas caudas da distribuição *t de Student* para avaliação do teste, dada a definição da hipótese nula.

### 3.3.2.2 Critério de Interpretação do coeficiente de correlação

Embora definida a interpretação do coeficiente de correlação quando igual a 1 (linear perfeita positiva), -1 (linear perfeita negativa) e 0 (sem correlação linear),

na prática ocorrem valores diferentes para  $\hat{\rho}$ . Esta interpretação depende muito dos objetivos de sua utilização e as razões pelas quais este é calculado (LIRA, 2004).

Existem critérios distintos estabelecidos por autores para esta interpretação do coeficiente de correlação ( $|\hat{\rho}|$ ) entre 0 e 1, conforme apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4 – Interpretação do coeficiente de correlação**

<b>Autores</b>	<b>Crítérios de interpretação do coeficiente de correlação</b>	
Sounis (1971)	$ \hat{\rho}  < 0,15$	desprezível
	$0,15 <  \hat{\rho}  < 0,29$	baixo
	$0,3 <  \hat{\rho}  < 0,49$	apreciável
	$0,5 <  \hat{\rho}  < 1,0$	acentuado
Crespo (2009)	$0 <  \hat{\rho}  < 0,3$	muito fraca
	$0,3 <  \hat{\rho}  < 0,6$	fraca
	$0,6 <  \hat{\rho}  < 1,0$	forte
Martins e Domingues (2011)	$0 <  \hat{\rho}  < 0,4$	péssima
	$0,4 <  \hat{\rho}  < 0,6$	baixa
	$0,6 <  \hat{\rho}  < 0,8$	média
	$0,8 <  \hat{\rho}  < 0,9$	boa
	$0,9 <  \hat{\rho}  < 1,0$	alta ou ótima
Kokoska (2013)	$0 <  \hat{\rho}  < 0,5$	fraca
	$0,5 <  \hat{\rho}  < 0,8$	moderada
	$0,8 <  \hat{\rho}  < 1,0$	forte

Fonte: Autora (2014)

Nesta pesquisa foi adotado o critério de interpretação do coeficiente de correlação definido por Crespo (2009), considerando ainda que para valores de  $|\hat{\rho}|$  maiores à 0,9 as correlações são classificadas como muito fortes, conforme estabelecido por Martins e Domingues (2011).

### 3.3.2.3 Determinação da maior correlação entre duas variáveis

Conforme exposto por Buzzi (2007), a influência de condições ambientais na leitura dos instrumentos nem sempre ocorre imediatamente, devido ao 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 alterações ambientais.

Sendo assim, julgou-se oportuno quantificar os tempos de resposta à variação da temperatura e como esta variação influencia os instrumentos.

Para isso, primeiramente foram calculadas as correlações organizando-se as leituras sem a determinação de atrasos ou antecipações. Em seguida os dados foram reorganizados com a consideração de atrasos ou antecipações (de 1 semana por vez) para uma das variáveis, até que o coeficiente de correlação entre elas chegasse ao seu máximo.

Da mesma forma, verificou-se o tempo de resposta: à abertura da fissura no medidor de vazão; à variação da temperatura no NA; e à variação do NA no medidor de vazão.

Feitos os cálculos de correlação, foram traçadas as curvas “coeficientes de correlação versus semanas de atraso” de cada par de variáveis, para visualização gráfica do maior valor de correlação obtido.

#### 3.3.2.4 *Diagramas de dispersão e equações de regressão linear*

Após a determinação da maior correlação entre as variáveis, foram traçados os diagramas de dispersão, onde foram plotados os pontos (“leituras da variável X” *versus* “leituras da variável Y”) em um sistema de coordenadas cartesianas.

Segundo Buzzi (2007), mediante a observação direta do próprio diagrama de dispersão é possível determinar, de modo qualitativo, se existe relação linear entre as variáveis. Se todos os pontos desse diagrama situaram-se nas proximidades de uma reta, pode-se dizer que existe uma relação linear entre essas variáveis.

Como nesta pesquisa foram calculados os coeficientes de correlação, foram determinados de forma quantitativa os graus de relacionamento linear entre as variáveis e, portanto, quão bem certas as retas estabelecidas pelos diagramas de dispersão representam estas relações.

A reta definida para cada um dos diagramas de dispersão, através da linha de tendência linear, representa a reta de melhor ajuste ou reta de mínimos quadrados, que segundo Fusaro (2007), é definida como sendo aquela em que a soma dos quadrados dos resíduos (diferenças entre os dados e os valores previstos) é a mínima possível.

Das retas foram obtidas as equações de regressão linear, que representam a relação linear entre cada par de variáveis.

E ainda, para estabelecer os limites além das equações, que contemplem 100% dos valores observados no intervalo de tempo considerado na pesquisa, foram

calculados os valores históricos máximos de dispersão, para mais e para menos, em relação a equação de regressão linear obtida.

#### 3.3.2.5 *Ferramenta de controle e monitoramento*

Nesta etapa da pesquisa foi desenvolvida uma ferramenta de controle e monitoramento, baseada nas equações de regressão linear de cada par de variáveis, considerando-se as constantes definidas a partir das maiores dispersões ocorridas historicamente. Esta ferramenta foi desenvolvida no MS Excel.

#### 3.3.3 Terceiro estágio: conclusão

No terceiro estágio é apresentada a proposta do processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade, assim como são relatadas as considerações da pesquisa, contemplando os objetivos atingidos, se o problema de pesquisa foi respondido e se o desenvolvimento da pesquisa trouxe benefícios para a área acadêmica, assim como para a área técnica.

#### 4. O ESTUDO DE CASO - FISSURA DO BLOCO B-11 DA BARRAGEM DA UHE GJR

A usina Governador José Richa (UHE GJR), anteriormente denominada Usina Salto Caxias, entrou em operação no mês de outubro de 1998. Está localizada no rio Iguaçu a cerca de 204 km de sua foz, no município de Capitão Leônidas Marques distante aproximadamente 600 km de Curitiba (ZORZI e RIGOTI, 2011).



**Figura 8** – Foto aérea da Usina Hidrelétrica Governador José Richa  
Fonte: COPEL (2012)

De acordo com INTERTECHNE *et al.* (1999) a barragem é uma estrutura de concreto gravidade, com altura máxima sobre a fundação de 67 metros no trecho do leito do rio e foi construída com concreto compactado com rolo - CCR até a El. 327,70 tendo seu coroamento acabado em concreto convencional, na El. 328,0. O paramento de montante é vertical. A face de jusante tem inclinação de 1,0V:0,75H abaixo da El. 315,0, sendo vertical acima desta cota. O volume total de CCR executado foi de 946.000 metros cúbicos. O comprimento total do barramento perfaz 1.100 metros.

Na margem direita do barramento encontram-se as adufas de desvio, em concreto convencional, sobre as quais foi construída parte da barragem de CCR e o vertedouro, cuja estrutura de concreto convencional foi executado sobre o maciço de CCR. Na margem esquerda e leito do rio, foi construído o trecho principal da



barragem de CCR, a partir do último bloco do vertedouro (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

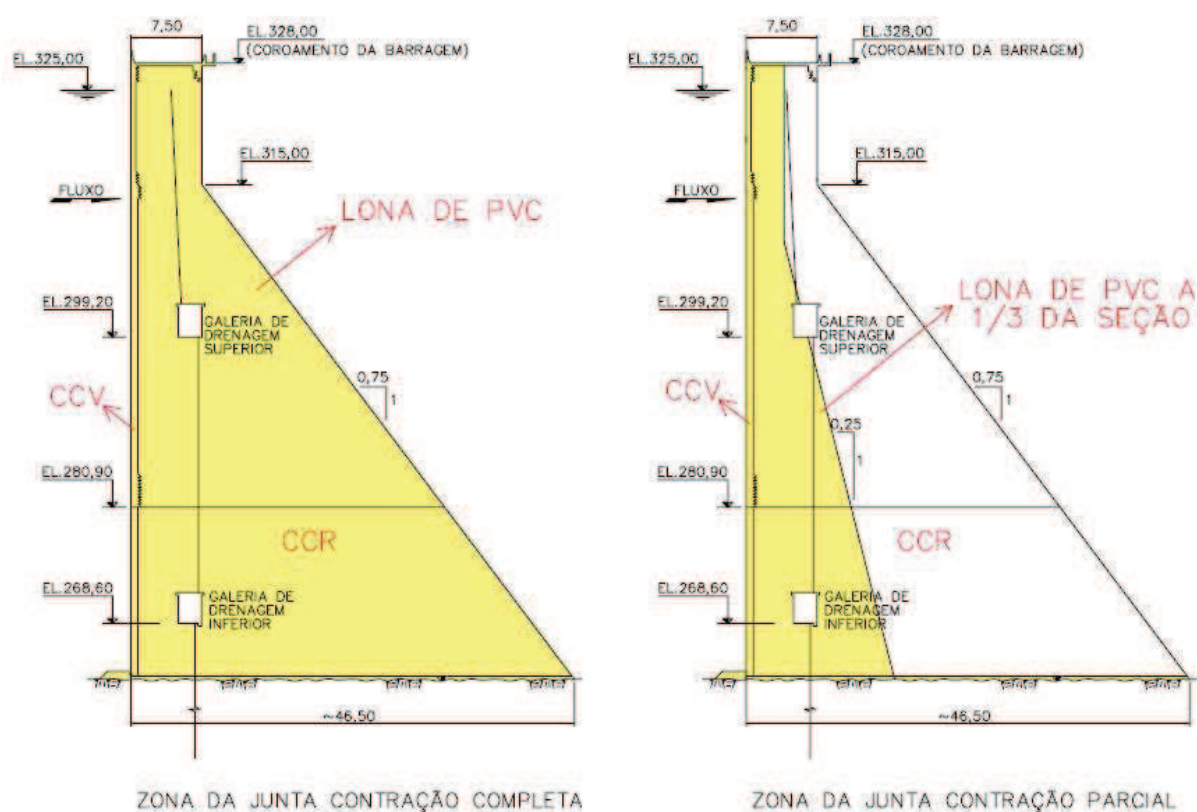
Para assegurar níveis adequados de estanqueidade para o maciço de CCR, foi executada uma parede vertical de concreto convencional vibrado na face de montante do maciço de CCR, que no trecho da barragem foi executado em camadas, juntamente com o CCR no processo de construção conhecido como “Árvore de Natal”. A espessura de concreto convencional da face de montante foi de 0,75 metro abaixo da El. 315 sem emprego de armadura e acima desta elevação, a espessura foi reduzida para 0,5 metro (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

De acordo com INTERTECHNE *et al.*, 1999, foram considerados os seguintes dados de projeto:

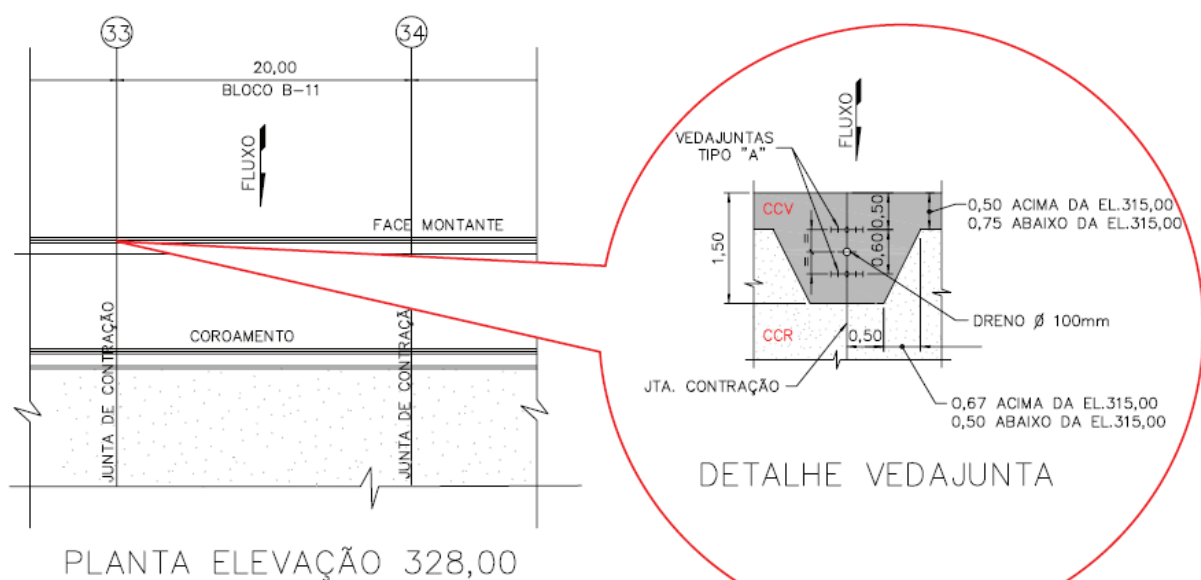
- Espessura da camada compactada de CCR igual a 30 centímetro;
- Densidade mínima a ser atingida após a compactação igual a 2,55 t/m<sup>3</sup>, correspondente a 97% da densidade teórica do concreto;
- Emprego sistemático de argamassa de ligação entre camadas de CCR, em toda a sua extensão;
- Resistência característica do concreto compactado com rolo igual a 8 MPa aos 180 dias e a do concreto convencional da face de montante com 8,5 MPa aos 180 dias.

A barragem foi dividida em blocos isolados por juntas de contração que são estáveis por si só, não dependendo dos blocos laterais e contíguos (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

As juntas de contração transversais à barragem cortaram por completo a seção a cada 40 metros. Juntas de contração parciais, com corte do terço de montante do maciço foram executadas também a cada 40 metros, intercaladas às juntas de contração completas (vide Figura 9). Na face de montante as juntas ficaram espaçadas a cada 20,0 metros, sendo embutidas na parede de concreto convencional duas lâminas de vedajuntas verticais de PVC e um dreno com diâmetro de 100 mm entre elas (vide Figura 10). No maciço de CCR, as juntas foram formadas pelo corte sistemático de cada camada, após sua compactação, executado com a colocação de folhas duplas de PVC (INTERTECHNE *et al.*, 1999).



**Figura 9** – Seções transversais da barragem, sendo a esquerda uma junta de contração completa e a direita uma junta de contração parcial  
 Fonte: Autora (2014), adaptado de Soares *et al.* (2006)



**Figura 10** – Detalhe dos vedajuntas e dreno  
 Fonte: Autora (2014), adaptado de Soares *et al.* (2006)

Para o sistema de drenagem interna e inspeção do maciço de CCR foram construídas duas galerias longitudinais em níveis diferentes. A barragem de CCR do leito do rio conta com uma galeria inferior na El. 268,6 e uma galeria superior na El. 299,2. A galeria inferior se estende pela margem esquerda perimetralmente à fundação chegando até à El. 299,0 onde se conecta à galeria superior e segue até seu final na ombreira esquerda, com saída na El. 318,7 (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

Foi executada uma cortina de impermeabilização a partir da laje no pé de montante da barragem, em linha única, com injeção de furos exploratórios, primários, secundários e terciários (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

Quanto a drenagem, foi executada uma cortina da fundação, a partir da galeria inferior. Também foi executada a cortina no corpo da barragem de CCR, sendo que uma linha de furos conecta as duas galerias e outra linha de furos está acima da galeria superior, a partir do teto da galeria até a El. 325 (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

#### 4.1. CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM

A construção da barragem (do B5 ao B22) transcorreu do mês de fevereiro de 1996 a junho de 1998, sendo dividida em 3 etapas (INTERTECHNE *et al.*, 1999, e COPEL, 2013):

- A 1ª etapa ocorreu de fevereiro a maio de 1997, no verão, compreendendo a construção do trecho entre os blocos B5 e B11 da El. 262,60 (fundação) até a El. 280,90, formando uma “ensecadeira” de CCR com 18,30 m de altura por 280,00 m de comprimento;
- A 2ª etapa compreendeu a concretagem da margem esquerda, do bloco B12 ao bloco B22, até a El. 328, que corresponde a crista da barragem, no período de inverno do ano de 1997. Durante a construção desta 2ª etapa, no período de agosto a novembro de 1997, ocorreram cinco (5) grandes cheias, com vazões maiores a 7.000 m<sup>3</sup>/s, afogando as adufas e galgando o trecho construído na 1ª etapa, o que provocou o rápido resfriamento do CCR;
- A 3ª etapa de concretagem, correspondente ao alteamento dos blocos B5 ao B11, ocorreu onze meses depois o início da 1ª etapa, em janeiro de

1998, no verão, com altas temperaturas ambientes, em cima de um maciço de CCR com diferentes temperaturas internas.

Segundo COPEL (2013) por questões de compromisso que definiram o adiantamento em seis meses o início da geração, houve a necessidade de aumentar a produção da concretagem e, conseqüentemente, aumentar o ritmo de execução do trecho de 280 m, entre os blocos B5 e B11, batendo recordes de produção de lançamento de CCR. A temperatura interna no maciço chegou a 47°C, dificultando a dissipação de calor devido ao grande volume executado.

#### 4.2. IDENTIFICAÇÃO DE FISSURAS

Conforme informado por INTERTECHNE *et al.*, 1999, durante as inspeções para o fechamento do reservatório, no final de agosto de 1998, dois meses após o término do lançamento de concreto e a menos de um mês do início do enchimento do reservatório, foi detectada uma fissura vertical no bloco B-11 da barragem do leito do rio.

Essa fissura iniciava na parte inferior da parede perto da El. 281,5 com 0,6 a 1,0 mm de abertura e formava uma pequena ramificação até a El. 286,1. Este trecho foi injetado no período de 9 a 12 de setembro de 1998 com emprego de resina epoxídica bicomponente, tomando-se todas as medidas prévias como limpeza e impermeabilização superficial da fissura (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

Da El. 283,4 até o coroamento da barragem na El. 328,0, a fissura apresentava uma feição subvertical com abertura de 2 a 4 mm. A fissura cortava o bloco no sentido montante – jusante, e foi identificada na face de montante, na galeria de drenagem superior, no coroamento da barragem e na face de jusante. Devido ao reduzido prazo disponível para tratar esta fissura antes do início de enchimento do reservatório, foi decidido tentar a impermeabilização da face de montante com a instalação de vedajunta de PVC tipo “Jeene”, em setembro de 1998 (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

Logo após o enchimento do reservatório, em julho de 1999, notou-se no bloco B-5 uma infiltração na galeria de drenagem inferior entre a junta de contração dos blocos do vertedouro com a barragem (INTERTECHNE *et al.*, 1999), justamente no local da conexão entre a primeira e a segunda fase de construção do barramento. Em setembro de 1999, foi identificada nova fissura na galeria superior do bloco B-8.

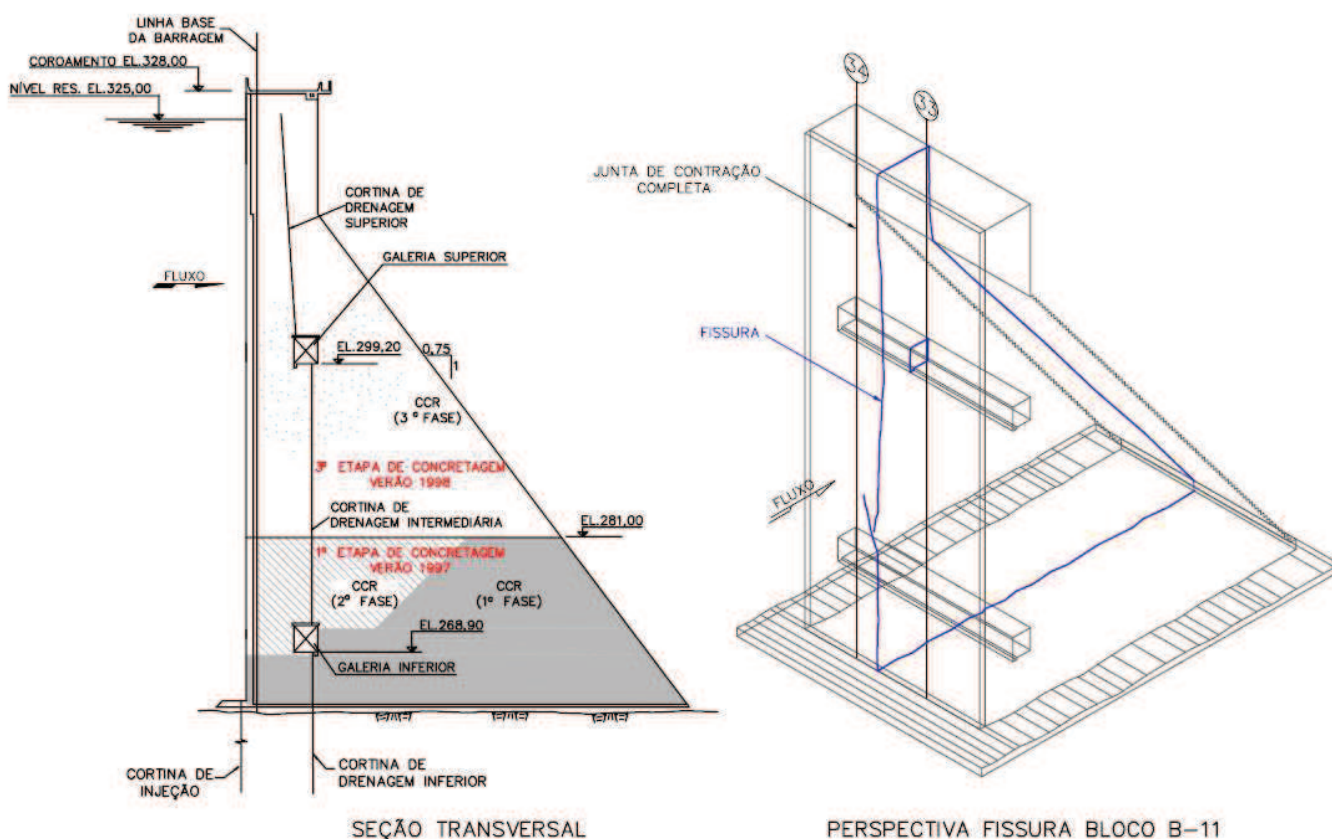
Soares *et al.* (2006) elenca o conjunto de causas prováveis de ocorrência das fissuras, conforme apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5 – Conjunto de causas prováveis de ocorrência das fissuras**

Ocorrência	Causa
Consumo de cimento do CCR igual a 100 kg/m <sup>3</sup>	Quanto maior o consumo de cimento, maior a geração de calor (temperatura) e de tensão interna
Interferência entre o fenômeno de fluência do concreto e o fenômeno térmico	Tensões internas no concreto
Barragem executada em três etapas distintas, com ocorrência de galgamentos	Latência de 11 meses entre a região inferior e a superior do maciço do trecho dos blocos B-5 ao B-11, influenciando os efeitos térmicos
Concretagem no período de verão	Temperatura ambiente mais elevada
Alteração do cronograma de execução com adiantamento em 6 meses, com intensificação do ritmo de execução	Aumento no ritmo e no volume de lançamento provocou a dificuldade na dissipação de calor do CCR entre as camadas
Volume muito grande de CCR	Dificuldade na dissipação de calor do CCR entre as camadas
No bloco B11 a colocação da junta tipo “Jeene” somente entre a EI. 328 à EI 281	A fissura expandiu até a fundação EI 264
A não formação esperada da junta de indução, verificada nas galerias e na face de jusante	Criação de “novas juntas” (fissuras)

Fonte: Adaptado de Soares *et al.* (2006)

Por tudo isto, Soares *et al.* (2006) afirma que uma das causas da ocorrência das fissuras dos blocos B-5, B-8 e B-11 é de origem térmica, resultante de tensões internas da massa de concreto da barragem.



**Figura 11** – Etapas de construção dos blocos B-5 a B-11 e perspectiva da seção da barragem do bloco B-11

Fonte: Autora (2014), adaptado de Soares *et al.* (2006)

#### 4.3. ESTABILIDADE DA BARRAGEM COM A FISSURA DO BLOCO B-11

INTERTECHNE *et al.* (1999) realizaram uma reanálise da estabilidade da barragem de CCR em decorrência da fissura do bloco B-11, que é transversal e define um plano essencialmente vertical cruzando o maciço no sentido montante-jusante.

Para reanálise da estabilidade concebeu-se um modelo simulando uma situação de carregamento extremamente conservadora, considerando um diagrama de subpressão retangular em uma determinada camada de CCR, onde foi imposta a pressão do reservatório a montante, bem como considerando-se parâmetros de resistência do maciço de CCR menores que os obtidos de testemunhos retirados do corpo da estrutura. O objetivo foi mostrar por considerações extremas que os blocos da barragem estão seguros sem problemas quanto à sua estabilidade (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

Considerando que a fissura representa uma junta de contração adicional, que originou dois blocos isolados com largura de 13 e 27 metros, INTERTECHNE *et*

*al.* (1999) atestam não existir qualquer problema para a estabilidade do bloco B-11 decorrente da fissura. Acrescenta, ainda, que as surgências de água no paramento de jusante representam uma condicionante negativa apenas do ponto de vista estético para a barragem.

#### 4.4. TRATAMENTOS EFETUADOS NA FISSURA DO BLOCO B-11

No sentido de controlar o processo de evolução da fissura do bloco B-11 desde o início de enchimento do reservatório, a COPEL efetuou diversas intervenções, que consistiram basicamente de lançamento por montante, diretamente no reservatório, de uma mistura de materiais como areia, cimento, cinza volante e material fibroso - serragem de madeira, com a finalidade interromper temporariamente o fluxo de água, permitindo a execução de tratamentos mais permanentes (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

Segundo INTERTECHNE *et al.* (1999), para um tratamento mais permanente foram efetuadas injeções de cimento ao longo da fissura do bloco B-11 com execução de furos a partir da galeria superior e do coroamento da barragem, interceptando a fissura em diversos níveis. Foram também utilizados outros tratamentos complementares como a aplicação subaquática com mergulhadores, diretamente na face de montante ao longo da fissura, de uma resina epóxi e ainda a aplicação de poliuretano hidroativado a partir da galeria superior.

Foram executadas três etapas de injeção. A primeira, injeção dos furos abaixo da galeria inferior, em março de 1999, com absorção de 8,5 metros cúbicos de calda de cimento. Parte de material percolou pela face de jusante ao longo da fissura. A segunda etapa constou da injeção de três furos abertos a partir do coroamento da barragem, em julho de 1999, com absorção de 9,5 metros cúbicos de calda, principalmente no trecho acima da galeria superior. Parte do material foi perdido ao longo da fissura, na face de jusante. Na terceira etapa um destes furos – furo 8 - foi reperfurado, aprofundado até a fundação e injetado, em outubro de 1999. A absorção foi da ordem de 1,0 m<sup>3</sup> de calda com perdas de material na galeria inferior (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

Em todas as etapas de injeção da fissura do bloco B-11, associada com o lançamento de material no reservatório a montante da barragem, houve estanqueidade temporária do fluxo de água, tanto no plano da fissura, quanto nos

drenos e face de jusante. No entanto, após alguns dias os vazamentos voltaram a se estabelecer. INTERTECHNE *et al.* (1999) descreve os fatores que podem estar relacionados com o retorno dos vazamentos:

- Defeito de colocação da junta “Jeene” provocando seu descolamento em trechos localizados das paredes e torção destes vedajuntas nestes trechos;
- Dificuldade de contenção total do fluxo durante os processos de injeção de calda de cimento;
- Continuidade da retração do concreto, principalmente no período de inverno, com abertura da fissura atingindo valores da ordem de 5 a 6 milímetros e sua progressão para baixo até a fundação da barragem, elevação 264,0.

Segundo COPEL (2013), em outubro de 2000 executou-se nova injeção, sendo utilizados 20 kg de poliuretano e 10 kg de gel. Ainda em 2000, foram executados dois furos para drenar a água até a galeria inferior. Por último, em 2005, foi executado um furo (6”), com o objetivo principal na extração de testemunho para ensaios, interceptando a fissura em vários pontos, a partir da crista da barragem atingindo a galeria inferior, totalizando o comprimento de 56,50 m.

No geral, pode-se dizer que ao final, a maioria destes tratamentos alcançou o seu objetivo, pois, ocorreu o preenchimento parcial do material aplicado na fissura. Os registros mais concretos estão nas amostras dos testemunhos, onde verificou-se a presença de calda de cimento e poliuretano na interceptação da fissura (COPEL, 2013).

#### 4.5. VAZÕES DE PERCOLAÇÃO

Desde o início do enchimento do reservatório foram efetuadas medidas de vazão de percolação da barragem e da fundação, a partir de leituras em cada dreno e leituras gerais em 8 medidores triangulares de vazão (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

O aumento da vazão total percolada está diretamente relacionado com a abertura das fissuras nos blocos B-5, B-8 e B-11, sendo que a fissura do bloco B-11 apresenta a abertura mais significativa (INTERTECHNE *et al.*, 1999).

Passados 15 anos do enchimento do reservatório e operação da barragem, nota-se que a temperatura ambiente tem influência direta na abertura / fechamento



das fissuras do maciço de CCR e, conseqüentemente nas vazões de infiltrações cujo comportamento é sazonal. Isto é, durante o período de inverno na região da UHE GJR, de junho a outubro, quando as temperaturas são mais baixas, com registros frequentes abaixo de 10°C, há influência direta da temperatura ambiente no maciço de concreto, que se ‘retraí’ décimos de milímetro nas juntas e fissuras abrindo-as, permitindo maior passagem da água. No verão, período de novembro a maio, o concreto se expande, provocando o fechamento das juntas e fissuras e conseqüentemente a diminuição da vazão de infiltração (COPEL, 2013).

Historicamente, do período considerado verão para o inverno, há um aumento de aproximadamente 87% na vazão média das fissuras (19,2 l/s para 35,9 l/s) (COPEL, 2013).

Especificamente a fissura do bloco B-11 influencia diretamente o medidor de vazão MVZ6 (com ângulo de vértice igual a 90°), localizado no bloco B-09 (COPEL, 2013). Pode-se considerar, inclusive, que toda a contribuição deste medidor é proveniente desta fissura.

#### 4.6. INSTRUMENTAÇÃO COMPLEMENTAR

Em outubro de 2002, em parceria com o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) e com a Universidade Federal do Paraná (UFPR), foi iniciado pela COPEL um projeto de P&D intitulado “Aplicação de Métodos Numéricos para o Estudo do Comportamento Termo-Estrutural de Barragens de Concreto e Conjugação com Instrumentação”. Dentre as diretrizes metodológicas do projeto estava a aquisição e instalação de novos instrumentos, com o objetivo de obtenção de dados que indiquem o comportamento das fissuras transversais, bem como seu monitoramento.

A fim de monitorar as três fissuras principais (dos blocos B-5, B-8 e B-11) foram instalados fissurômetros de corda vibrante, para medir as aberturas das fissuras (unidimensional), e termômetros de superfície, de corda vibrante, na seção da fissura do bloco B-11, a fim de obter a temperatura ambiente em uma seção da barragem a) na crista na face de montante; e b) na face de jusante (LACTEC, 2003).

Conforme citado por LACTEC (2005), estes instrumentos são a prova d’água, automatizados, de leitura remota e compatíveis com o sistema existente. A utilização de sensores automatizados se justifica devido às dificuldades de se

realizarem as leituras manualmente, uma vez que os pontos de instalação estão permanentemente sob a ação da percolação.

Os sensores desta instrumentação complementar estão ligados às mesmas unidades de medição e controle da instrumentação original da barragem.

A partir das leituras destes instrumentos (fissurômetros e termômetros) instalados na seção da fissura do bloco B-11, bem como das vazões obtidas no medidor de vazão MVZ6, nesta pesquisa:

- Verificou-se a correlação entre destes dados, a fim de confirmar a influência da temperatura ambiente sobre a abertura da fissura;
- Criou-se parâmetros para gerar uma ferramenta de controle e monitoramento do comportamento desta fissura.

#### 4.6.1 Especificações dos fissurômetros e termômetros

Em primeiro momento foram instalados fissurômetros do modelo *Crackmeter* 52636099 da fabricante Slope Indicator. Pouco tempo depois, estes sensores foram substituídos por outros do modelo *Crackmeter* 4420 da fabricante Geokon, dos quais foram originadas as leituras utilizadas nesta pesquisa.

Na fissura do bloco B-11 foram instalados 3 (três) fissurômetros, sendo um na crista, outro na galeria superior e outro na galeria inferior. Na Tabela 6 são apresentadas as especificações destes instrumentos.

**Tabela 6** – Especificações dos fissurômetros instalados no bloco B-11 da UH GJR

<b>Propriedade</b>	<b>Especificação</b>
Fabricante	Geokon
Tipo do sensor	Corda vibrante. Modelo 4420
Amplitude	50 mm
Sensibilidade	0,025% F.S.
Acurácia	± 0,1% F.S.
Não-linearidade	< 0,5% F.S.
Limites de operação de temperatura	-20 °C a 80 °C
Dimensões	318 mm, 362 mm e 527 mm
Diâmetro do transdutor	25 mm
Grandeza	Abertura/fechamento da fissura em mm

Fonte: Autora (2014), adaptado de LACTEC (2003)

Os 2 (dois) termômetros de superfície instalados próximos à fissura do bloco B-11, sendo um na face de montante e outro na face de jusante da barragem, são sensores automatizados de corda vibrante, cuja função básica é de registrar as temperaturas externas aos blocos de concreto da barragem, possibilitando uma correlação com os registros dos medidores de fissuras (fissurômetros) instalados (LACTEC, 2005). Na Tabela 7 são apresentadas as especificações destes instrumentos.

**Tabela 7** – Especificações dos termômetros instalados no bloco B-11 da UH GJR

<b>Propriedade</b>	<b>Especificação</b>
Fabricante	Geokon
Tipo do sensor	Corda vibrante. Modelo 4700
Amplitude padrão	100° C (-20 °C a +80 °C)
Sensibilidade	0,034° C
Acurácia <sup>(1)</sup>	± 0,5° C
Tempo de resposta <sup>(2)</sup>	2,5 min
Equilíbrio térmico <sup>(3)</sup>	15 min
Cabo	4 vias com blindagem, 22 AWG
Peso	115 g
Comprimento x Diâmetro	127 x 19 mm
Grandeza	Temperatura - °C

(1) Estabelecido de acordo com condições de laboratório

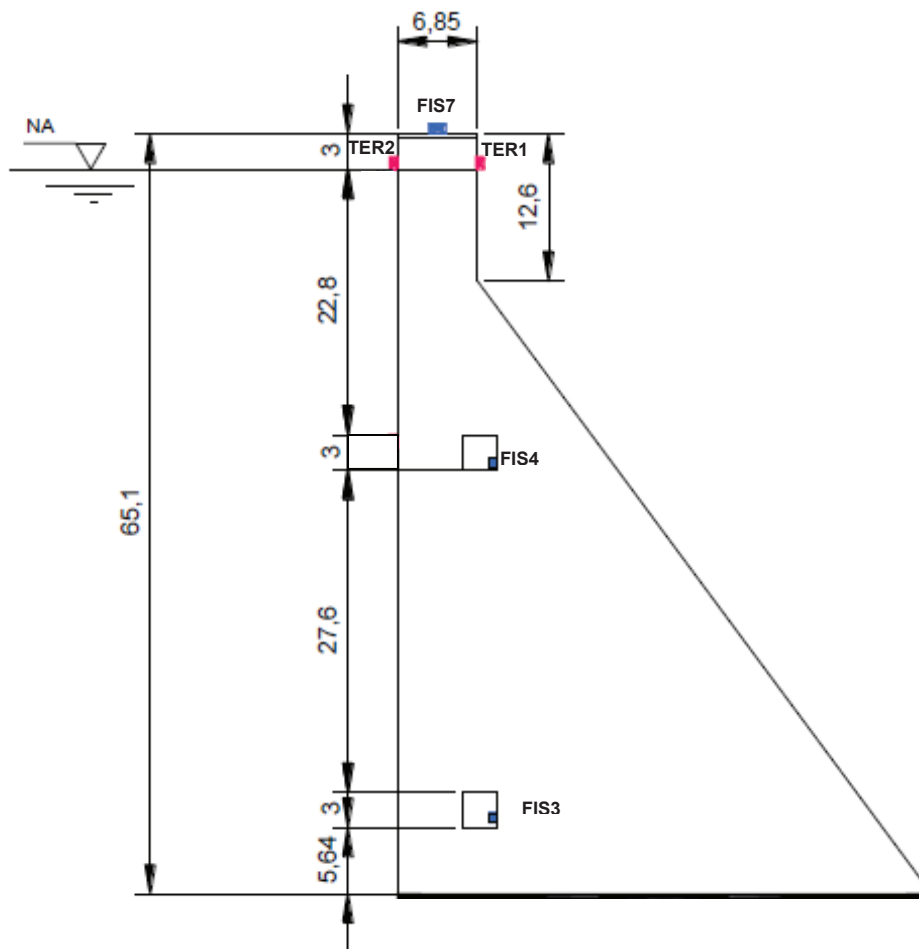
(2) Tempo requerido para alcançar 62,3% de uma mudança instantânea de temperatura

(3) Tempo máximo para alcançar o equilíbrio térmico

Fonte: Autora (2014), adaptado de LACTEC (2005)

#### 4.6.2 Localização dos instrumentos

A Figura 12 apresenta um esquema da seção transversal do bloco B-11 da barragem da UHE GJR, com a indicação da localização dos fissurômetros e termômetros.



**Figura 12** – Esquema da seção transversal do bloco B-11 da barragem da UHE GJR e localização dos instrumentos  
 Fonte: Autora (2014), adaptado de LACTEC (2005)

As fotos dos instrumentos FIS3, MVZ6, TER1 e TER2 são apresentadas na Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16, respectivamente.



**Figura 13** – Foto do fissurômetro FIS3, instalado na galeria inferior da barragem da UHE GJR  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 14** – Foto do medidor de vazão MVZ6, localizado na galeria inferior da barragem da UHE GJR  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 15** – Foto do termômetro de superfície TER1, localizado na face de jusante da barragem da UHE GJR  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 16** – Foto do termômetro de superfície TER2, localizado na face de montante da barragem da UHE GJR  
Fonte: Autora (2014)

#### 4.6.3 Leituras iniciais dos fissurômetros

Na Tabela 8 são apresentados os dados de instalação dos primeiros medidores de fissuras (fissurômetros), da fabricante Slope Indicator no bloco B-11 da barragem da UHE GJR, bem como as respectivas temperaturas e leituras iniciais dos sensores de corda vibrante (frequência em Hz).

**Tabela 8** – Leituras iniciais dos fissurômetros instalados no bloco B-11 da UH GJR

Fissurômetros	Data instalação	Horário da instalação	Temperatura (°C)	1ª Leitura (Hz)	1ª Leitura “Leitura Inicial” (mm)
FIS3	21/05/2004	8:50	34,6	6256,1	25,9
FIS4	21/05/2004	8:40	34,1	7661,9	33,1
FIS7	21/05/2004	9:05	33,6	6819,8	28,4

Fonte: Autora (2014), adaptado de LACTEC (2005)

Baseado nestes valores, os instrumentos foram calibrados, para que as leituras indicassem a abertura ou o fechamento em relação a estas leituras iniciais. Conforme indicado por LACTEC (2005), o comportamento das fissuras, abertura ou fechamento, é avaliado de acordo com essas informações.

Não foram encontradas informações se quando da substituição destes instrumentos pelos da fabricante Geokon, foram mantidas estas leituras iniciais ou se o sistema foi novamente calibrado. Sendo assim, nesta pesquisa as leituras dos fissurômetros foram analisadas sem a consideração de leitura inicial. Todavia, para a interpretação do movimento baseado nas leituras, evidencia-se que quanto mais negativa, maior a abertura da fissura.

#### 4.6.4 Análise dos dados entre 21/05/2004 e 19/01/2005

LACTEC (2005) apresenta a análise das leituras dos fissurômetros do período compreendido entre 21/05/2004 e 19/01/2005.

Com relação aos instrumentos da fissura do bloco B-11, LACTEC (2005) relatou o seguinte:

- O fissurômetro que apresentou maior variação de movimentação foi o FIS7, localizado na crista da barragem, a montante. Este medidor foi o que apresentou maior influência em relação à temperatura ambiente, com o comportamento coerente com a variação desta;

- O fissurômetro FIS4, localizado na galeria superior, apresentou-se praticamente com leitura constante;
- Na galeria inferior, onde está localizado o fissurômetro FIS3, registrou-se pouquíssima variação das leituras, uma vez que se encontra em uma região da barragem com forte restrição à movimentação das juntas e fissuras.

LACTEC (2005) complementou, ainda, que os valores de controle deveriam ser definidos posteriormente, quando se dispusesse de um conjunto de dados mais significativo.

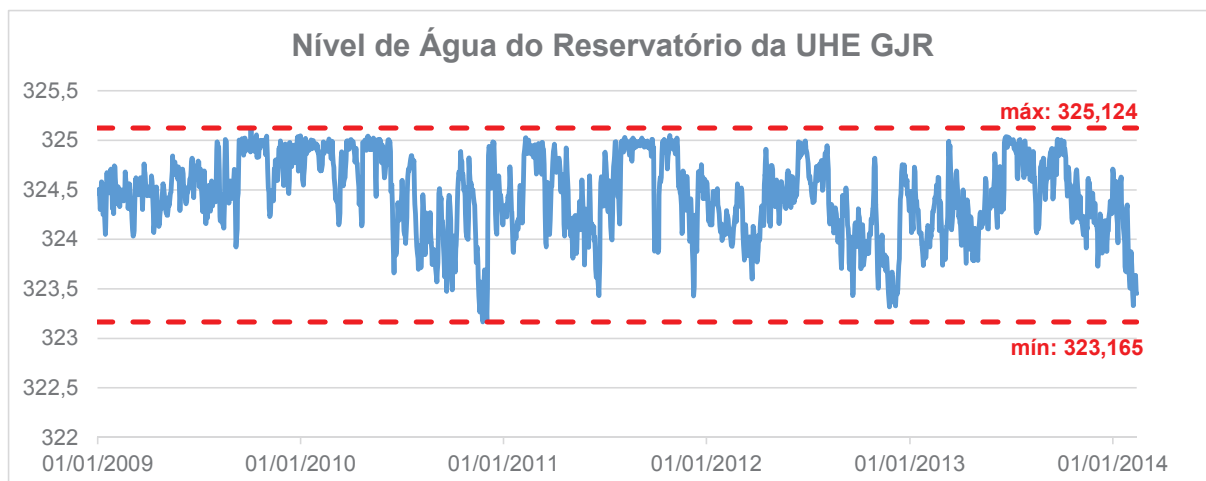
#### 4.7. DADOS E PERÍODO ANALISADOS NESTA PESQUISA

Nas análises realizadas nesta pesquisa foram usadas as leituras de todos os instrumentos instalados na fissura do bloco B-11, compreendendo os 2 (dois) termômetros e os 3 (três) fissurômetros, e do medidor de vazão MVZ6, por onde passa toda a água percolada da fissura na galeria de drenagem inferior da barragem. Todos estes instrumentos são automatizados, portanto as leituras não estão suscetíveis a erros humanos.

Apesar de se dispor das leituras desde a instalação dos instrumentos, a pesquisa restringiu os estudos aos últimos 4,5 anos (junho/2009 a novembro/2013) pois neste período todos os instrumentos já apresentavam-se calibrados e produziram dados confiáveis.

Assim como pesquisado por Huang e Chen (2012), nesta pesquisa também foi analisada a influência do nível do reservatório nas leituras dos instrumentos da fissura do bloco B-11, conseqüentemente na vazão de percolação, embora o nível do reservatório a montante da barragem da UHE GJR varie no máximo 2 metros ao longo do ano (conforme apresentado na Figura 17), o que representa variação consideravelmente baixa em relação a altura total da barragem (67 metros). Esta etapa da pesquisa também restringiu os estudos aos últimos 4,5 anos (junho/2009 a novembro/2013).





**Figura 17** – Nível de água do reservatório da UHE GJR, de janeiro de 2009 a janeiro de 2014  
Fonte: Autora (2014), baseado em dados históricos obtidos da COPEL

#### 4.8. PREPARAÇÃO DOS DADOS

Todos os dados das leituras dos instrumentos da fissura do bloco B-11 e do medidor de vazão MVZ6 estavam armazenados em banco de dados da COPEL, em arquivo do software MS ACCESS, no computador localizado na galeria de drenagem da barragem, cuja função é coletar e armazenar as leituras de todos os instrumentos automatizados da estrutura. Estes dados foram copiados para arquivo do MS EXCEL, no qual foram realizados todos os cálculos.

A denominação destes instrumentos desde a sua instalação foi mantida nesta pesquisa e é apresentada na Tabela 9.

**Tabela 9** – Instrumentos de auscultação da fissura do bloco B-11 da barragem da UHE GJR

Sigla	Denominação	Unidade de medida	Localização
TER1	Termômetro para medir a temperatura ambiente	Graus Celsius	Jusante da crista da barragem
TER2	Termômetro para medir a temperatura ambiente	Graus Celsius	Face montante da crista da barragem
FIS3	Fissurômetro para medir a abertura (unidimensional) da fissura	Milímetros de abertura/fechamento	Parede montante da galeria inferior
FIS4	Fissurômetro para medir a abertura (unidimensional) da fissura	Milímetros de abertura/fechamento	Parede montante da galeria superior
FIS7	Fissurômetro para medir a abertura (unidimensional) da fissura	Milímetros de abertura/fechamento	Face montante da crista da barragem
MVZ6	Medidor de vazão da água percolada na galeria inferior	Centímetros (a partir do vértice da placa triangular)	Galeria inferior, bloco 9 da barragem

Fonte: Autora (2014)

Conforme estabelecido no item 3.3.1, primeiramente procurou-se organizar as leituras de forma que cada linha da planilha apresentasse as leituras do mesmo dia e horário. Como cada instrumento possuía uma periodicidade de leitura (em linhas gerais, horária para os termômetros, diária para o medidor de vazão e semanal para os fissurômetros), se só fossem consideradas as linhas da planilha que tivessem as leituras de todos os instrumentos, muitos dados seriam desconsiderados no estudo.

Baseado nisto e no fenômeno da propagação do calor que ocorre de maneira lenta e a dilatação resultante depende da quantidade de calor absorvida durante vários dias consecutivos, os dados foram reorganizados, calculando-se as médias das leituras por semana. Neste cálculo foram consideradas todas as leituras disponíveis de cada instrumento.

Na Tabela 10 são apresentadas para cada instrumento o intervalo de dados disponível, o número de leituras disponível, o intervalo de dados abordado e o número de leituras obtidas (médias semanais).

**Tabela 10 – Intervalo e número de dados disponíveis e abordados de cada instrumento**

<b>Sigla dos instrumentos</b>	<b>Intervalo de dados disponíveis</b>	<b>Número de leituras disponíveis</b>	<b>Intervalo de dados abordados</b>	<b>Número de leituras obtidas (médias semanais)</b>
TER1	11/03/2009 a 18/10/2013	36.823	31/05/2009 a 18/10/2013	227
TER2	20/07/2006 a 18/10/2013	35.425	31/05/2009 a 18/10/2013	227
FIS3	09/08/2005 a 05/11/2013	660 *	31/05/2009 a 05/11/2013	221
FIS4	28/03/2008 a 05/11/2013	618 *	31/05/2009 a 05/11/2013	221
FIS7	16/03/2009 a 05/11/2013	560 *	31/05/2009 a 05/11/2013	217
MVZ6	30/07/2005 a 05/11/2013	4.099	31/05/2009 a 05/11/2013	231

(\*) As leituras dos fissurômetros a partir de 22/10/2013 passaram de semanais a horárias  
Fonte: Autora (2014)

Quanto aos dados de nível de água (NA) do reservatório, a montante da barragem da UHE GJR, estes estavam disponíveis no banco de dados do Departamento de Hidrologia da COPEL. Foi obtida uma cópia das leituras diárias, correspondente ao horário da meia-noite (às 24h00min), em arquivo pdf, do qual foram copiadas para um arquivo do MS Excel, para organização dos dados e realização dos cálculos. Da mesma forma que para os instrumentos, foram calculadas as médias semanais, perfazendo 232 leituras no intervalo de 31/05/2009 a 05/11/2013.

## 5. RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS

Os resultados das análises estão separados em quatro partes, sendo na primeira apresentadas as correlações entre pares de instrumentos, na segunda as correlações entre instrumentos e o nível de água do reservatório (NA) à montante da barragem, na terceira o resumo de todas as análises, com a proposta da ferramenta de controle e monitoramento da fissura do bloco B-11 e na quarta o fluxograma da proposta do processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade.

### 5.1. CORRELAÇÕES ENTRE PARES DE INSTRUMENTOS

A apresentação dos cálculos de correlação entre pares de instrumentos segue a seguinte organização: primeiramente estão os cálculos e as análises das correlações entre o medidor de vazão (MVZ6) e todos os outros instrumentos (TER1, TER2, FIS3, FIS4 e FIS7); na sequência entre os termômetros (TER1 e TER2) e os fissurômetros (FIS3, FIS4 e FIS7); e por fim entre instrumentos de mesmo tipo, ou seja, entre os termômetros e entre os fissurômetros. Contudo, nesta seção são apresentadas as correlações de 15 (quinze) pares de instrumentos.

#### 5.1.1 Correlação entre o medidor de vazão MVZ6 e o termômetro TER1

As leituras do medidor de vazão MVZ6, localizado na galeria inferior da barragem, e do termômetro TER1, localizado na face de jusante da barragem, foram alocados em uma única matriz. Adotando-se as médias semanais das leituras, conforme estabelecido no item 3.3.1, foram obtidos 227 pares de leituras para o cálculo de correlação.

A fim de avaliar o tempo de resposta à temperatura ambiente, medida pelo TER1, nas leituras do medidor de vazão MVZ6, de acordo com o descrito no item 3.3.2.3, primeiramente foram calculadas as correlações sem a determinação de atrasos ou antecipações entre os dados e na sequência calculadas as correlações considerando antecipações (1 semana por vez) para as leituras do MVZ6, até que o coeficiente de correlação entre elas chegasse ao seu máximo.

Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 11 e na Figura 18.

Tabela 11 – Coeficientes de correlação entre TER1 e MVZ6

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
TER1	MVZ6	-0,2259	$6,0626 \times 10^{-4}$
TER1	MVZ6 (-1S)	-0,3192	$9,5713 \times 10^{-7}$
TER1	MVZ6 (-2S)	-0,3911	$1,1259 \times 10^{-9}$
TER1	MVZ6 (-3S)	-0,4602	$3,0312 \times 10^{-13}$
TER1	MVZ6 (-4S)	-0,5266	$1,8657 \times 10^{-17}$
TER1	MVZ6 (-5S)	-0,5887	$2,7551 \times 10^{-22}$
TER1	MVZ6 (-6S)	-0,6331	$2,2281 \times 10^{-26}$
TER1	MVZ6 (-7S)	-0,6715	$1,8238 \times 10^{-30}$
TER1	MVZ6 (-8S)	-0,7125	$1,5169 \times 10^{-35}$
TER1	MVZ6 (-9S)	-0,7347	$1,3553 \times 10^{-38}$
TER1	MVZ6 (-10S)	-0,7507	$6,0810 \times 10^{-41}$
TER1	MVZ6 (-11S)	-0,7667	$1,8827 \times 10^{-43}$
TER1	MVZ6 (-12S)	-0,7561	$1,3854 \times 10^{-41}$
TER1	MVZ6 (-13S)	-0,7361	$3,9201 \times 10^{-38}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)

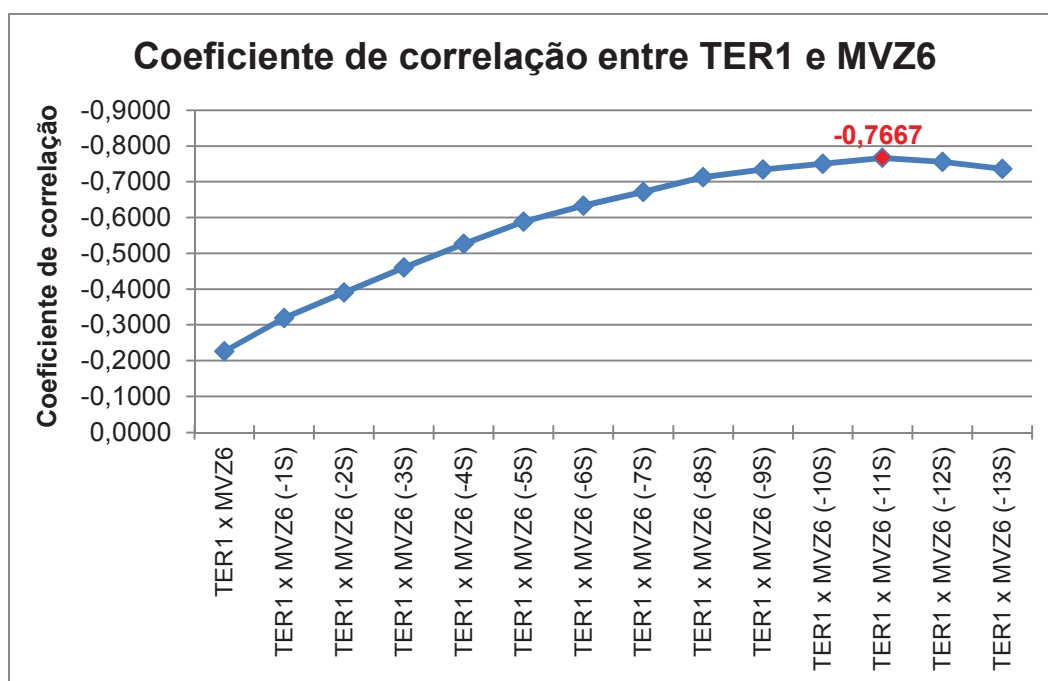


Figura 18 – Coeficientes de correlação entre TER1 e MVZ6

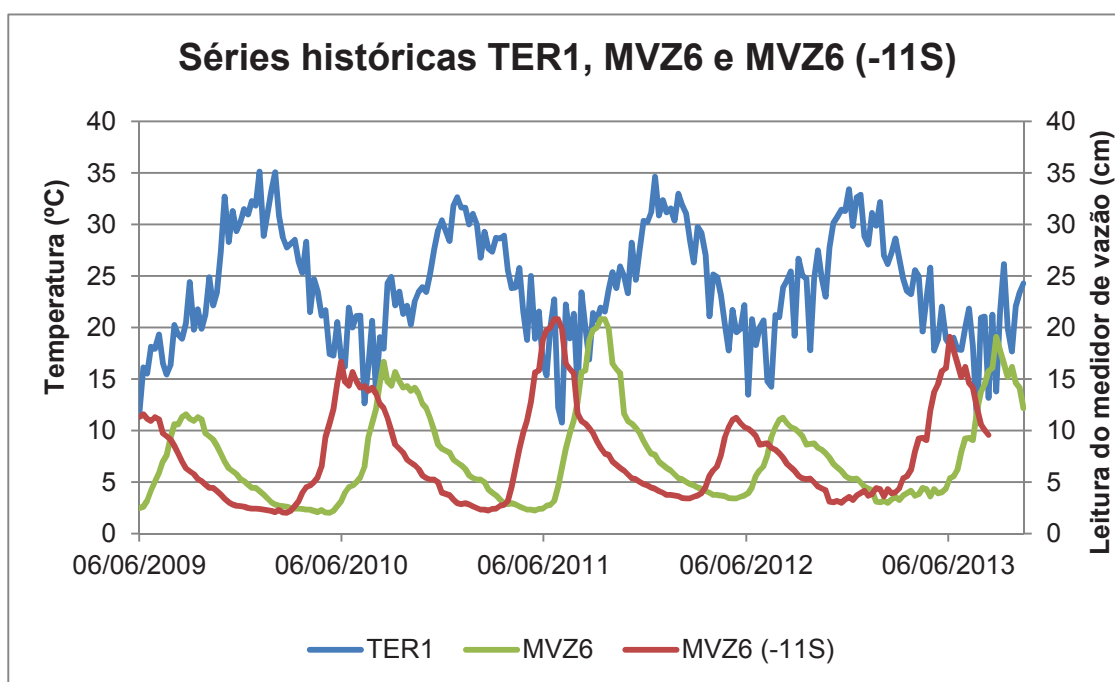
Fonte: Autora (2014)

Sendo assim, verificou-se que a maior correlação entre as leituras de TER1 e MVZ6 ocorre com 11 semanas de diferença, sendo, portanto, este o tempo de

resposta à temperatura ambiente na vazão de percolação pela fissura do bloco B-11 na galeria inferior da barragem. Sendo o coeficiente de correlação obtido igual -0,7667, considera-se, de acordo com o critério de Crespo (2009), que existe forte correlação linear negativa. Ou seja, quando a temperatura for máxima, a vazão de percolação será mínima e vice versa (vide Figura 19).

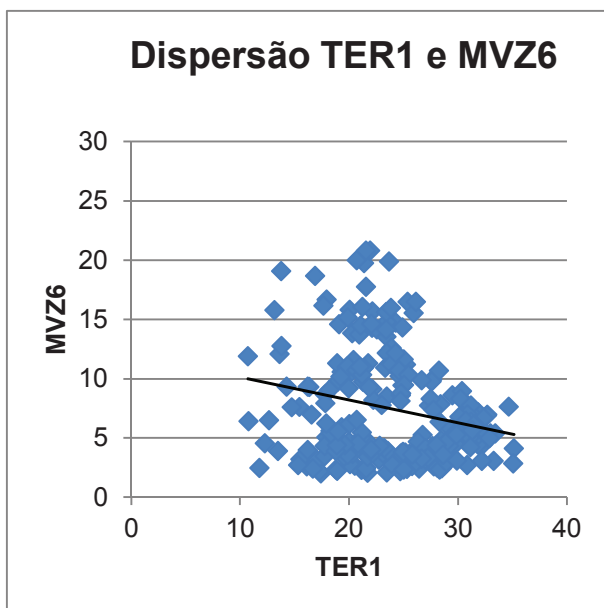
Este resultado vai de encontro ao esperado, visto que temperaturas ambientes elevadas provocam a dilatação do concreto da barragem, produzindo o fechamento das juntas entre blocos e, conseqüentemente, da fissura.

E ainda, foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 11.

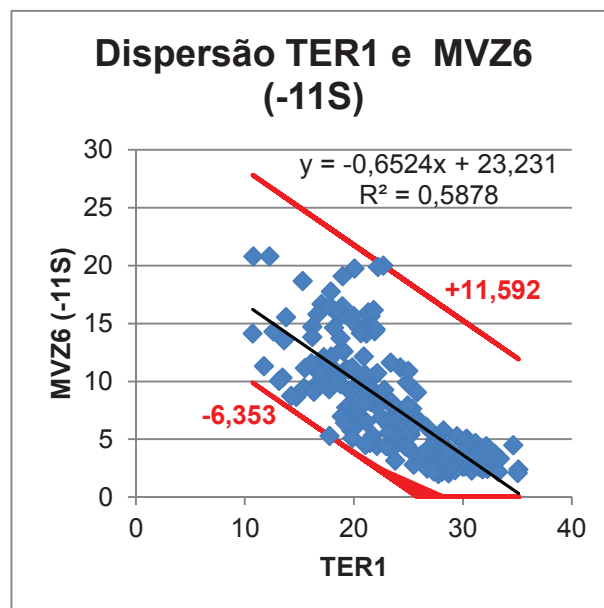


**Figura 19** – Séries históricas de TER1, MVZ6 e MVZ6 (-11S)  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 20 e na Figura 21 são apresentados os diagramas de dispersão de TER1 por MVZ6 e TER1 por MVZ6 (-11S), respectivamente.



**Figura 20** – Diagrama de dispersão de TER1 por MVZ6  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 21** – Diagrama de dispersão de TER1 por MVZ6 (-11S)  
Fonte: Autora (2014)

Especificamente quanto à Figura 21, embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, este é o diagrama que considera a maior correlação entre as variáveis, com o grau de confiança acima do desejado. Sendo assim, toma-se a equação de regressão linear da linha de tendência como sendo a melhor reprodução da relação entre TER1 e MVZ6 (-11S). Entretanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual a 0,5878, o que significa que o modelo consegue explicar 58,78% dos valores observados. Sendo que para contemplar 100%, deve-se definir uma amplitude além da reta, que neste caso é de 11,592 cm para mais (limite máximo) e 6,353 cm para menos (limite mínimo) na equação. E ainda, no caso do limite mínimo, como não é possível leitura negativa do medidor de vazão, considera-se 0 (zero) como o menor valor aceitável.

#### 5.1.2 Correlação entre o medidor de vazão MVZ6 e o termômetro TER2

Da mesma forma que realizado para o TER1, foram calculados os coeficientes de correlação entre as leituras do termômetro TER2, localizado na face de montante da barragem da UHE GJR, e o medidor de vazão MVZ6. Também foram considerados 227 pares de leituras.

Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 12 e na Figura 22.

Tabela 12 – Coeficientes de correlação entre TER2 e MVZ6

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
TER2	MVZ6	-0,3152	$1,2563 \times 10^{-6}$
TER2	MVZ6 (-1S)	-0,4116	$1,1848 \times 10^{-10}$
TER2	MVZ6 (-2S)	-0,4769	$3,0967 \times 10^{-14}$
TER2	MVZ6 (-3S)	-0,5377	$2,4554 \times 10^{-18}$
TER2	MVZ6 (-4S)	-0,5957	$5,3221 \times 10^{-23}$
TER2	MVZ6 (-5S)	-0,6490	$3,5939 \times 10^{-28}$
TER2	MVZ6 (-6S)	-0,6799	$1,3118 \times 10^{-31}$
TER2	MVZ6 (-7S)	-0,7036	$1,7485 \times 10^{-34}$
TER2	MVZ6 (-8S)	-0,7312	$3,0278 \times 10^{-38}$
TER2	MVZ6 (-9S)	-0,7398	$2,1742 \times 10^{-39}$
TER2	MVZ6 (-10S)	-0,7419	$1,5710 \times 10^{-39}$
TER2	MVZ6 (-11S)	-0,7437	$1,1955 \times 10^{-39}$
TER2	MVZ6 (-12S)	-0,7143	$3,5504 \times 10^{-35}$
TER2	MVZ6 (-13S)	-0,6760	$3,4209 \times 10^{-30}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)

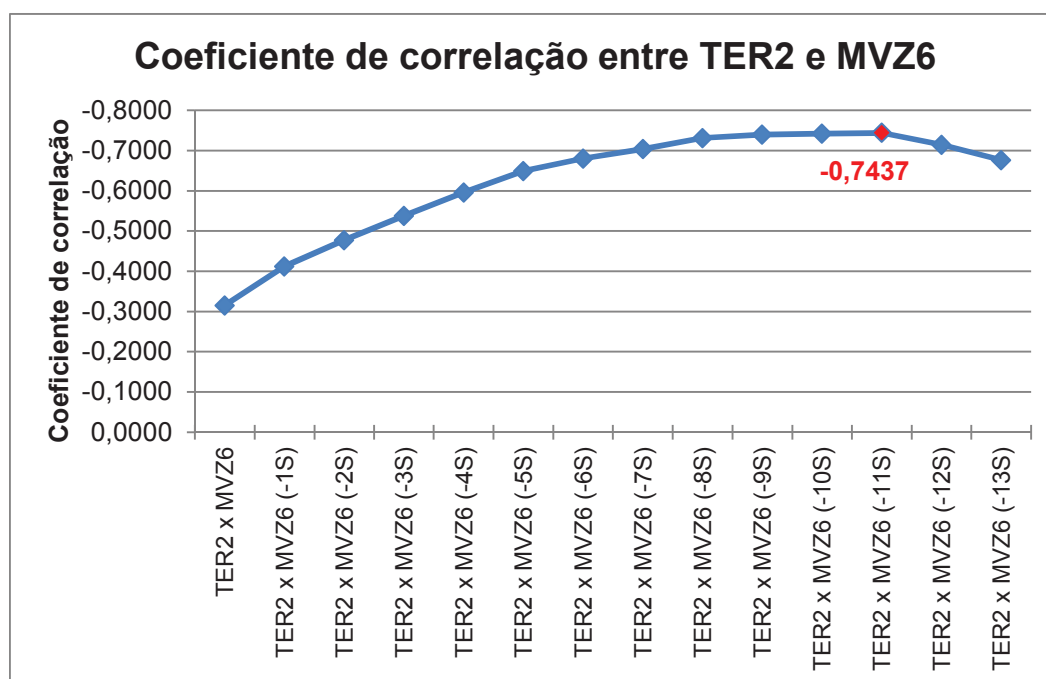


Figura 22 – Coeficientes de correlação entre TER2 e MVZ6

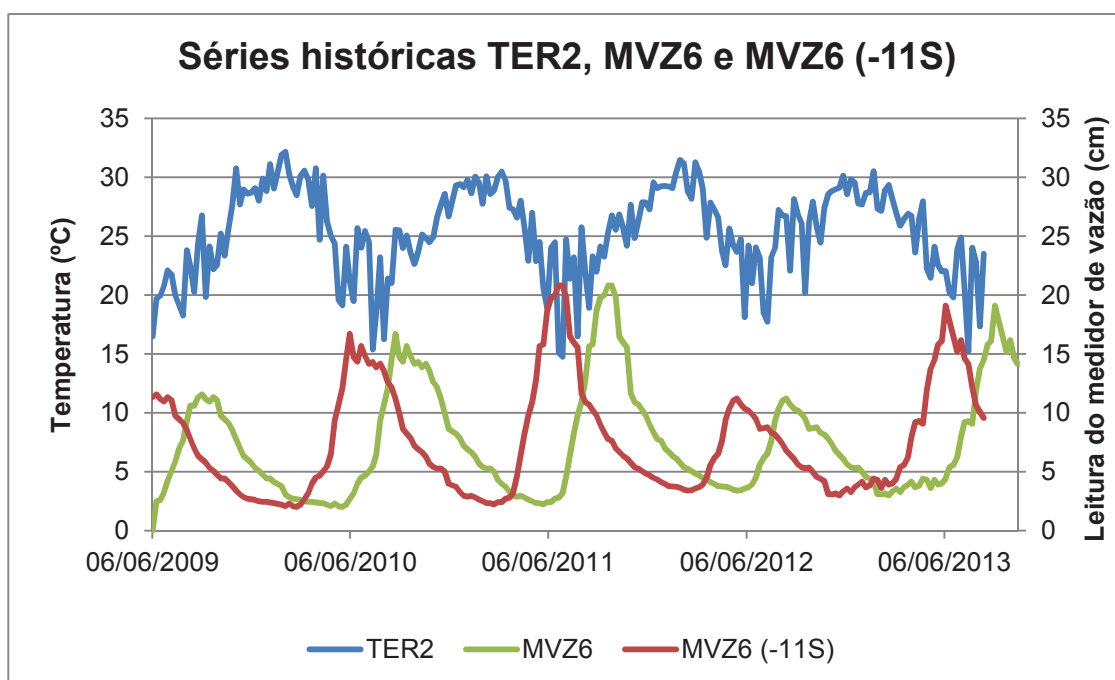
Fonte: Autora (2014)

Verificou-se, portanto, que a maior correlação entre as leituras de TER2 e MVZ6 também ocorre com 11 semanas de diferença. Sendo assim, confirma-se que o

tempo de resposta à temperatura ambiente na vazão de percolação pela fissura do bloco B-11 na galeria inferior da barragem é mesmo de 11 semanas.

Destes cálculos resultou o coeficiente de correlação igual  $-0,7437$ , que segundo o critério de Crespo (2009), representa forte correlação linear negativa. Novamente verifica-se, através da Figura 23, que quando a temperatura for máxima, a vazão de percolação será mínima e vice versa, conforme esperado.

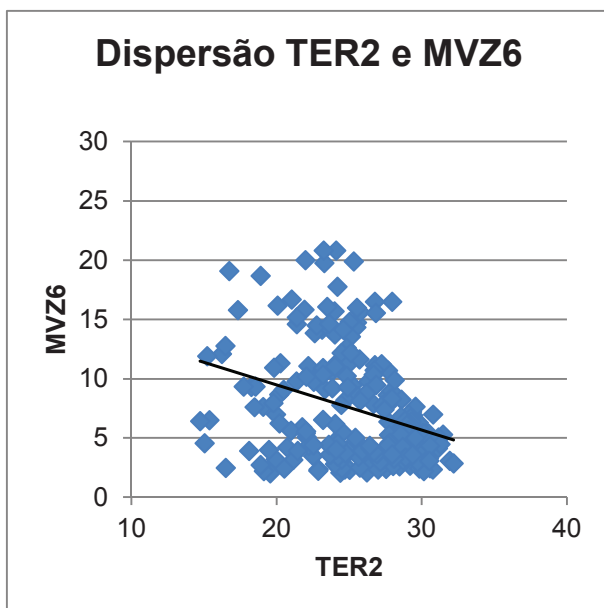
E ainda, foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 12.



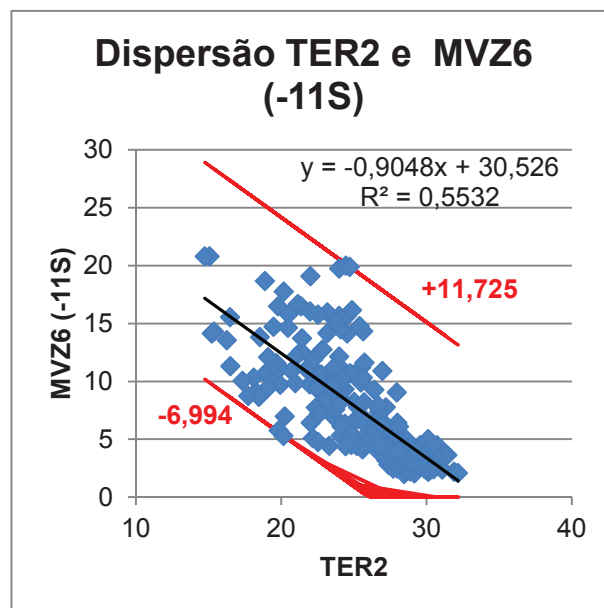
**Figura 23** – Séries históricas de TER2, MVZ6 e MVZ6 (-11S)  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 24 e na Figura 25 são apresentados os diagramas de dispersão de TER2 por MVZ6 e TER2 por MVZ6 (-11S), respectivamente.





**Figura 24** – Diagrama de dispersão de TER2 por MVZ6  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 25** – Diagrama de dispersão de TER2 por MVZ6 (-11S)  
Fonte: Autora (2014)

Especificamente quanto à Figura 25, embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, este é o diagrama que considera a maior correlação entre as variáveis, com o grau de confiança acima do desejado. Sendo assim, toma-se a equação de regressão linear da linha de tendência como sendo a melhor reprodução da relação entre TER2 e MVZ6 (-11S). Entretanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual a 0,5532, o que significa que o modelo consegue explicar 55,32% dos valores observados. Sendo que para contemplar 100%, deve-se definir uma amplitude além da reta, que neste caso é de 11,725 cm para mais (limite máximo) e 6,994 cm para menos (limite mínimo) na equação. E ainda, no caso do limite mínimo, como não é possível leitura negativa do medidor de vazão, considera-se 0 (zero) como o menor valor aceitável.

### 5.1.3 Correlação entre o medidor de vazão MVZ6 e o fissurômetro FIS3

Alocando-se em uma matriz as médias semanais, conforme estabelecido no item 3.3.1, das leituras do medidor de vazão MVZ6 e do fissurômetro FIS3, ambos instrumentos localizados na galeria inferior da barragem da UHE GJR, foram obtidos 221 pares de leituras para o cálculo de correlação.

A fim de avaliar o tempo de resposta à abertura da fissura na galeria inferior, medida pelo FIS3, nas leituras do medidor de vazão MVZ6, de acordo com o

descrito no item 3.3.2.3, primeiramente foram calculadas as correlações sem a determinação de atrasos ou antecipações entre os dados e na sequência calculadas as correlações considerando antecipações (1 semana por vez) para as leituras do MVZ6, até que o coeficiente de correlação entre elas chegasse ao seu máximo.

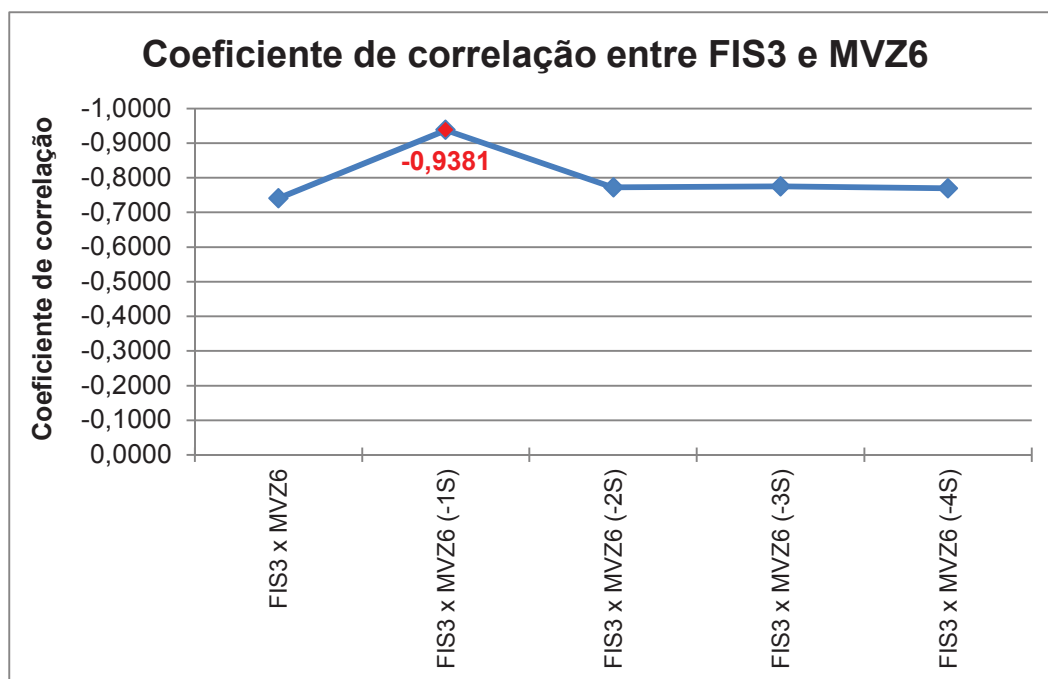
Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 13 e na Figura 26.

**Tabela 13** – Coeficientes de correlação entre FIS3 e MVZ6

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
FIS3	MVZ6	-0,7407	$1,0763 \times 10^{-39}$
FIS3	MVZ6 (-1S)	-0,9381	$6,4734 \times 10^{-102}$
FIS3	MVZ6 (-2S)	-0,7724	$1,8269 \times 10^{-44}$
FIS3	MVZ6 (-3S)	-0,7748	$1,0535 \times 10^{-44}$
FIS3	MVZ6 (-4S)	-0,7699	$1,2477 \times 10^{-43}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)



**Figura 26** – Coeficientes de correlação entre FIS3 e MVZ6

Fonte: Autora (2014)

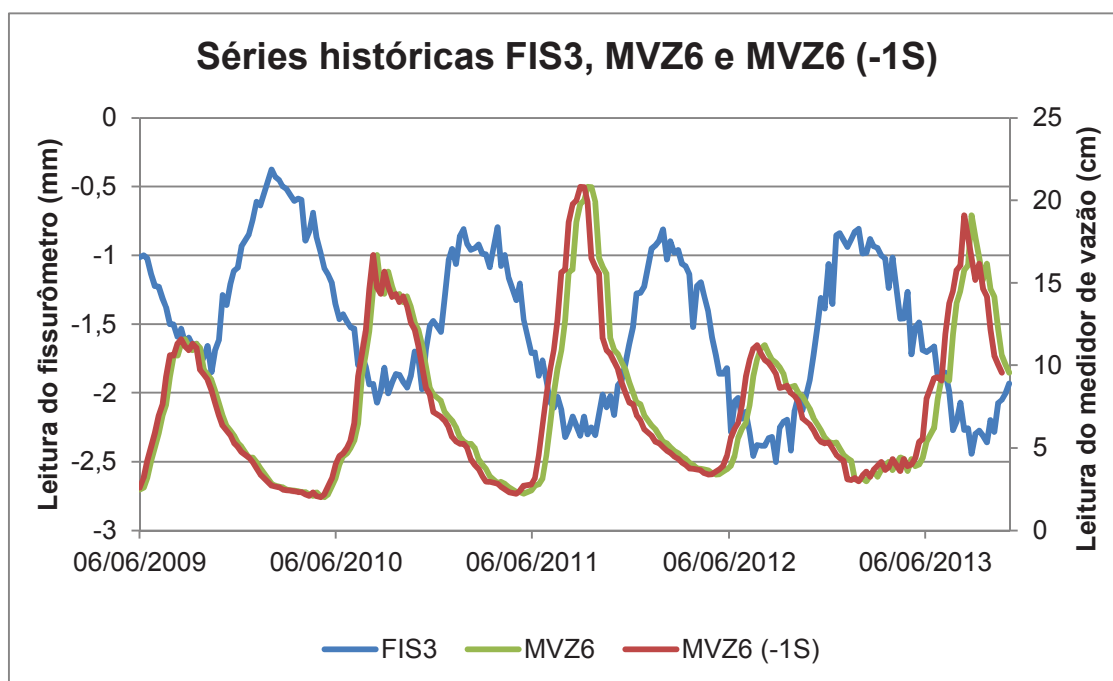
Sendo assim, verificou-se que a maior correlação entre as leituras de FIS3 e MVZ6 ocorre com 1 semana de diferença, sendo, portanto, este o tempo de resposta à abertura da fissura na galeria inferior na vazão de percolação pela fissura

do bloco B-11 na galeria inferior da barragem. Este tempo de resposta pequeno pode ser atribuído ao fato dos instrumentos localizarem-se próximos, na mesma galeria de drenagem.

Sendo o coeficiente de correlação obtido igual  $-0,9381$ , considera-se, de acordo com os critérios de Crespo (2009) e Martins e Domingues (2011), que existe correlação linear negativa muito forte. Ou seja, quanto a maior for o valor indicado do fissurômetro, o que indica maior fechamento da fissura, menor será a leitura da vazão de percolação e vice versa (vide Figura 27). Destaca-se que este for o maior coeficiente de correlação entre instrumentos de tipos diferentes encontrado nesta pesquisa.

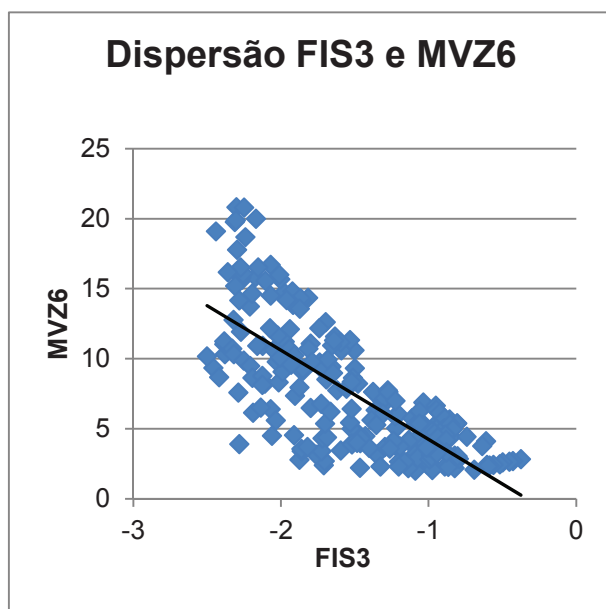
Este resultado corresponde às expectativas, tendo em vista que quanto menor a abertura da fissura, menos água percola e menor é a quantidade de água no medidor de vazão.

E ainda, foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são muito menores do que  $0,05$ , conforme indicado na última coluna da Tabela 13.

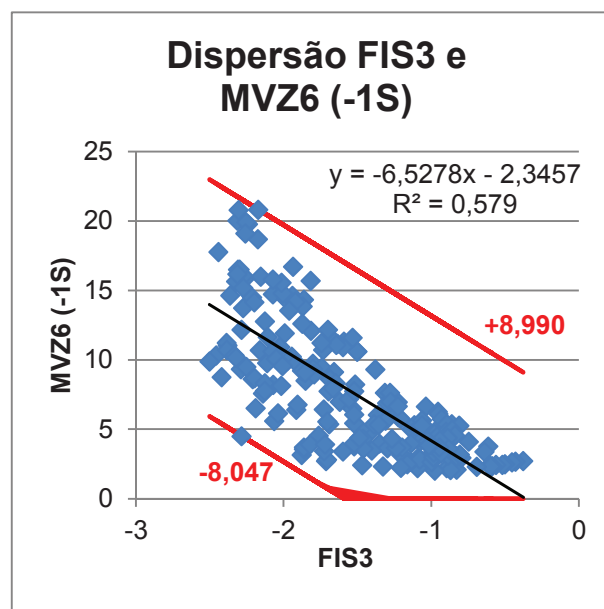


**Figura 27** – Séries históricas de FIS3, MVZ6 e MVZ6 (-1S)  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 28 e na Figura 29 são apresentados os diagramas de dispersão de FIS3 por MVZ6 e FIS3 por MVZ6 (-1S), respectivamente.



**Figura 28** – Diagrama de dispersão de FIS3 por MVZ6  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 29** – Diagrama de dispersão de FIS3 por MVZ6 (-1S)  
Fonte: Autora (2014)

Especificamente quanto à Figura 29, embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, este é o diagrama que considera a maior correlação entre as variáveis, com o grau de confiança acima do desejado. Sendo assim, toma-se a equação de regressão linear da linha de tendência como sendo a melhor reprodução da relação entre FIS3 e MVZ6 (-1S). Entretanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual a 0,5790, o que significa que o modelo consegue explicar 57,90% dos valores observados. Sendo que para contemplar 100%, deve-se definir uma amplitude além da reta, que neste caso é de 8,990 cm para mais (limite máximo) e 8,047 cm para menos (limite mínimo) na equação. E ainda, no caso do limite mínimo, como não é possível leitura negativa do medidor de vazão, considera-se 0 (zero) como o menor valor aceitável.

#### 5.1.4 Correlação entre o medidor de vazão MVZ6 e o fissurômetro FIS4

Da mesma forma que realizado para o FIS3, foram calculados os coeficientes de correlação entre as leituras do fissurômetro FIS4, localizado na galeria

superior da barragem da UHE GJR, e o medidor de vazão MVZ6. Também foram considerados 221 pares de leituras.

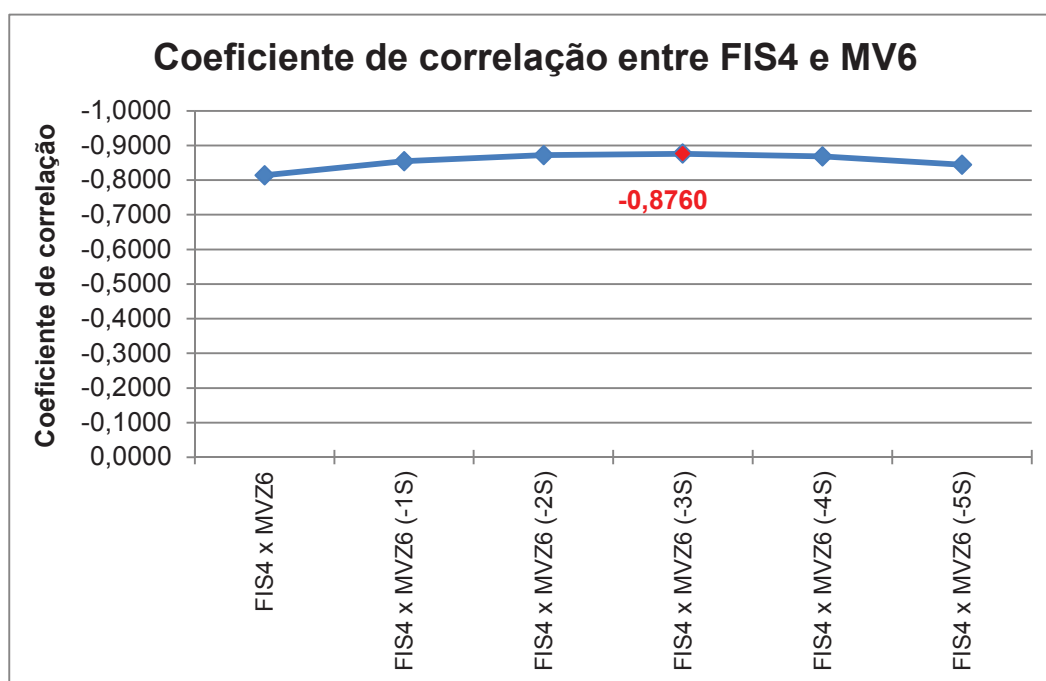
Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 14 e na Figura 30.

**Tabela 14 – Coeficientes de correlação entre FIS4 e MVZ6**

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
FIS4	MVZ6	-0,8141	$1,3611 \times 10^{-53}$
FIS4	MVZ6 (-1S)	-0,8543	$1,3718 \times 10^{-63}$
FIS4	MVZ6 (-2S)	-0,8718	$6,8393 \times 10^{-69}$
FIS4	MVZ6 (-3S)	-0,8760	$5,1958 \times 10^{-70}$
FIS4	MVZ6 (-4S)	-0,8689	$2,6901 \times 10^{-67}$
FIS4	MVZ6 (-5S)	-0,8445	$1,0960 \times 10^{-59}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)



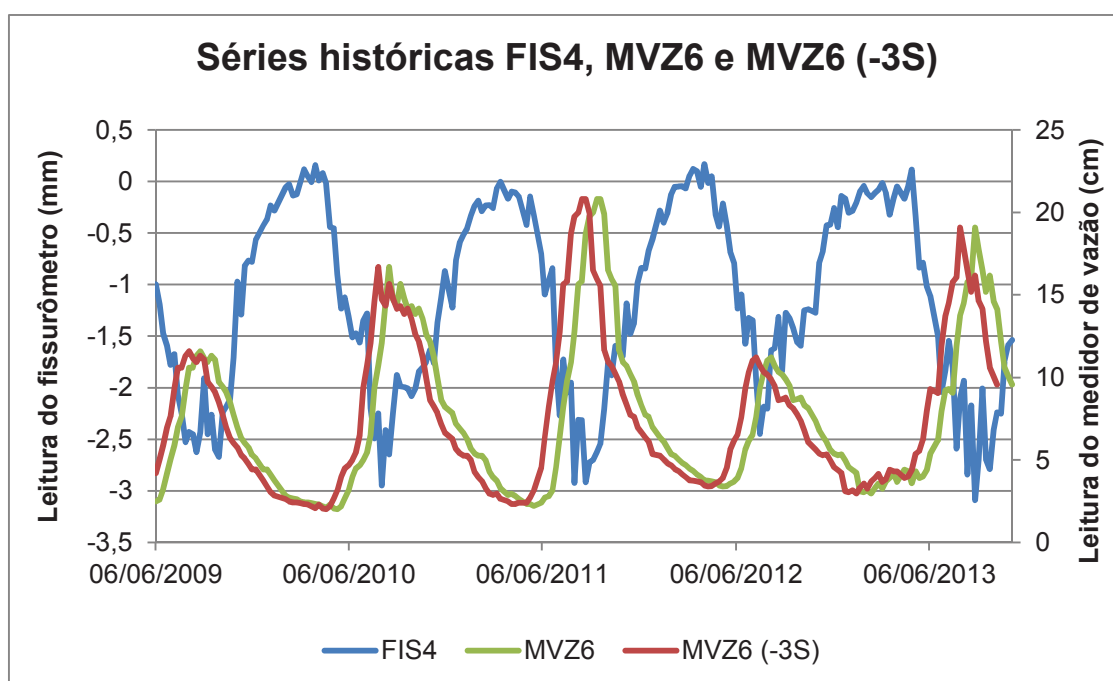
**Figura 30 – Coeficientes de correlação entre FIS4 e MVZ6**

Fonte: Autora (2014)

Verificou-se, portanto, que a maior correlação entre as leituras de FIS4 e MVZ6 ocorre com 3 semanas de diferença. Este maior tempo de resposta em relação ao FIS3 pode ser atribuído ao FIS 4 estar localizado na galeria de drenagem superior e o MVZ6 na inferior.

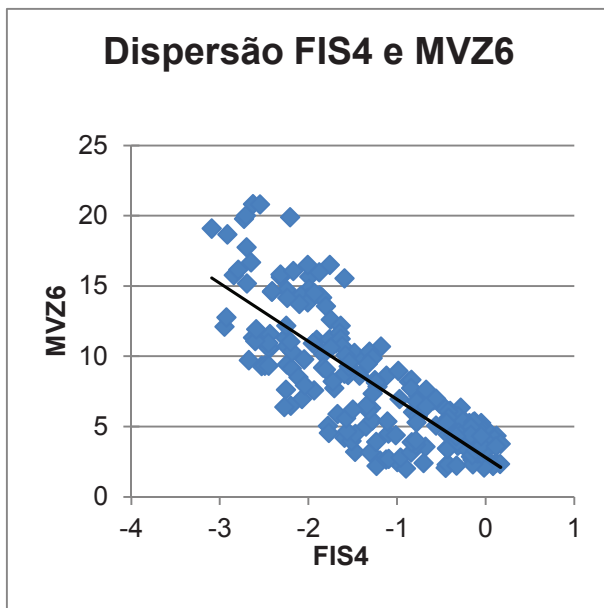
Destes cálculos resultou o coeficiente de correlação igual  $-0,8760$ , que segundo o critério de Crespo (2009), representa forte correlação linear negativa. Novamente verifica-se, através da Figura 31, que quanto maior for o valor indicado do fissurômetro, o que indica maior fechamento da fissura, menor será a leitura da vazão de percolação e vice versa, conforme esperado.

E ainda, foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que  $0,05$ , conforme indicado na última coluna da Tabela 14.

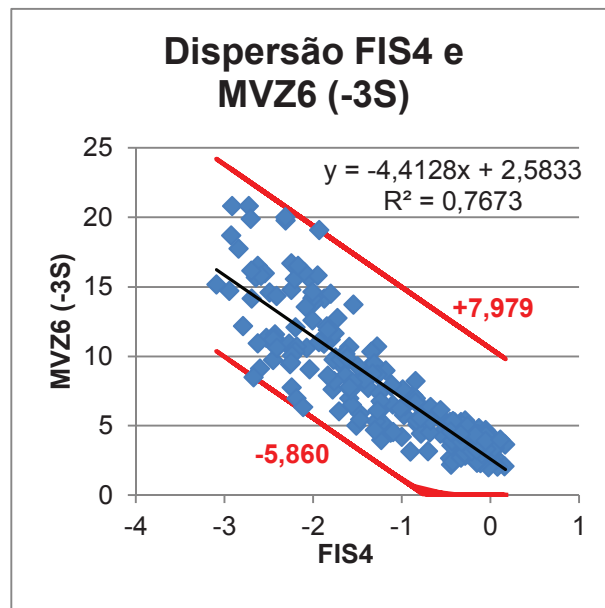


**Figura 31** – Séries históricas de FIS4, MVZ6 e MVZ6 (-3S)  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 32 e na Figura 33 são apresentados os diagramas de dispersão de FIS4 por MVZ6 e FIS4 por MVZ6 (-3S), respectivamente.



**Figura 32** – Diagrama de dispersão de FIS4 por MVZ6  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 33** – Diagrama de dispersão de FIS4 por MVZ6 (-3S)  
Fonte: Autora (2014)

Especificamente quanto à Figura 33, embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, este é o diagrama que considera a maior correlação entre as variáveis, com o grau de confiança acima do desejado. Sendo assim, toma-se a equação de regressão linear da linha de tendência como sendo a melhor reprodução da relação entre FIS4 e MVZ6 (-3S). Entretanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual a 0,7673, o que significa que o modelo consegue explicar 76,73% dos valores observados. Sendo que para contemplar 100%, deve-se definir uma amplitude além da reta, que neste caso é de 7,979 cm para mais (limite máximo) e 5,860 cm para menos (limite mínimo) na equação. E ainda, no caso do limite mínimo, como não é possível leitura negativa do medidor de vazão, considera-se 0 (zero) como o menor valor aceitável.

#### 5.1.5 Correlação entre o medidor de vazão MVZ6 e o fissurômetro FIS7

Da mesma forma que realizado para os FIS3 e FIS4, foram calculados os coeficientes de correlação entre as leituras do fissurômetro FIS7, localizado na crista da barragem (face montante) da UHE GJR, e o medidor de vazão MVZ6. Foram considerados 217 pares de leituras.

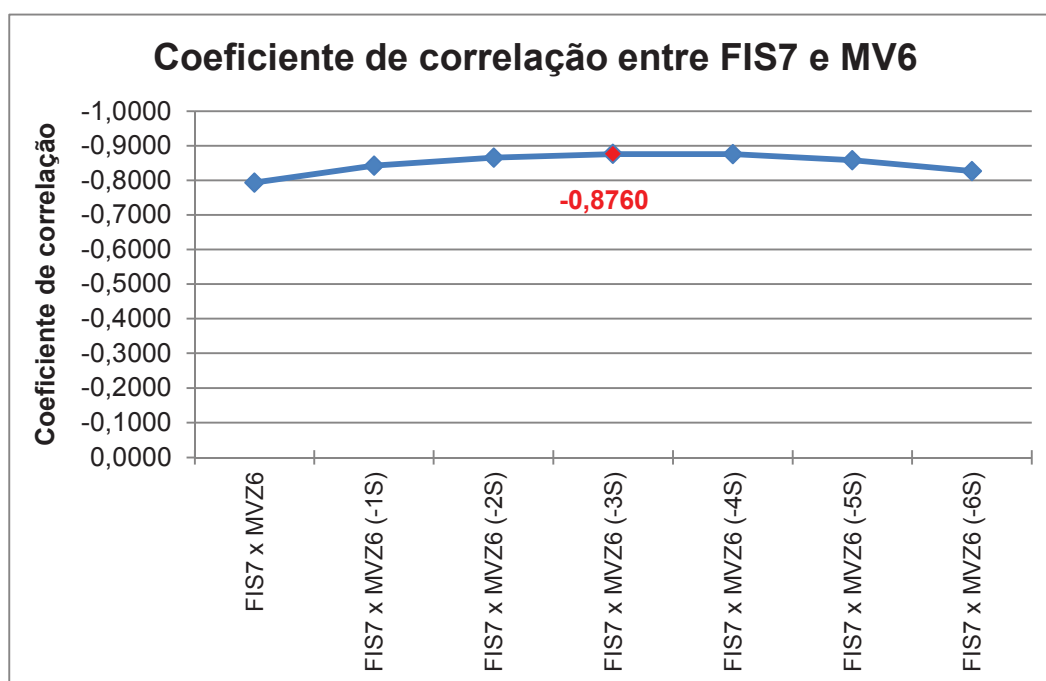
Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 15 e na Figura 34.

**Tabela 15** – Coeficientes de correlação entre FIS7 e MVZ6

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
FIS7	MVZ6	-0,7940	$2,3312 \times 10^{-48}$
FIS7	MVZ6 (-1S)	-0,8423	$4,3750 \times 10^{-59}$
FIS7	MVZ6 (-2S)	-0,8657	$1,1959 \times 10^{-65}$
FIS7	MVZ6 (-3S)	-0,8760	$9,6790 \times 10^{-69}$
FIS7	MVZ6 (-4S)	-0,8757	$2,4382 \times 10^{-68}$
FIS7	MVZ6 (-5S)	-0,8586	$1,4287 \times 10^{-62}$
FIS7	MVZ6 (-6S)	-0,8265	$8,2516 \times 10^{-54}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)

**Figura 34** – Coeficientes de correlação entre FIS7 e MVZ6

Fonte: Autora (2014)

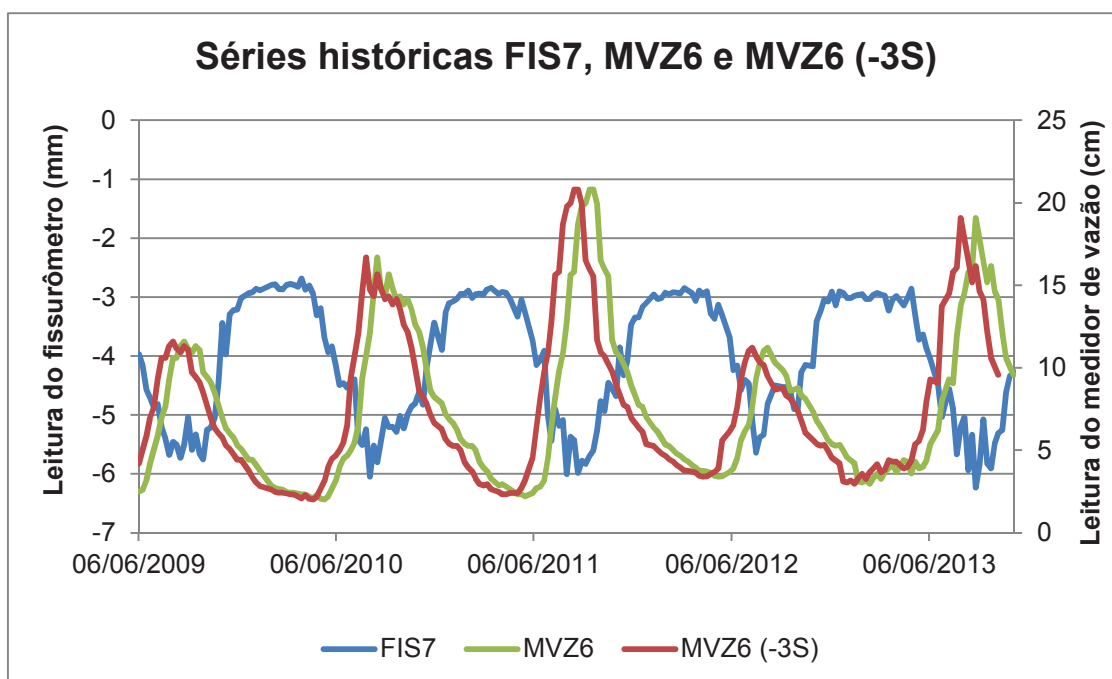
Verificou-se, portanto, que a maior correlação entre as leituras de FIS7 e MVZ6 ocorre com 3 semanas de diferença, que é o mesmo tempo de resposta verificado para o FIS4.

Destes cálculos resultou o coeficiente de correlação igual -0,8760, que coincidentemente é mesmo valor encontrado na correlação entre FIS4 e MVZ6. Segundo o critério de Crespo (2009), este coeficiente representa forte correlação linear negativa. Mais uma vez verifica-se, através da Figura 35, que quanto maior for



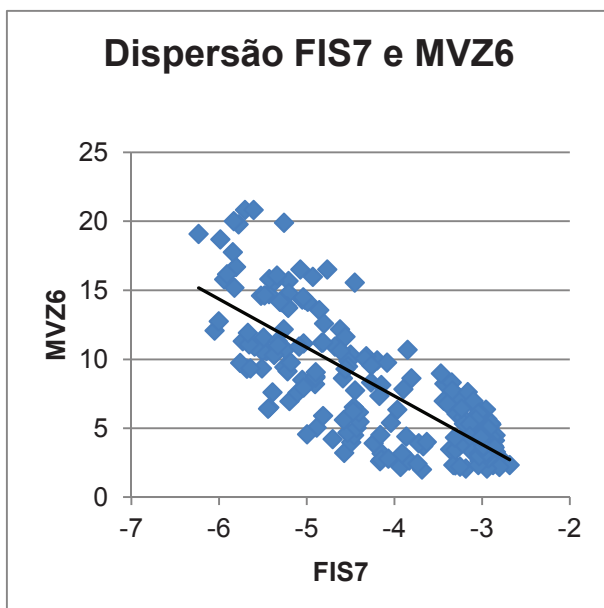
o valor indicado do fissurômetro, o que indica maior fechamento da fissura, menor será a leitura da vazão de percolação e vice versa, conforme esperado.

Também foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 15.

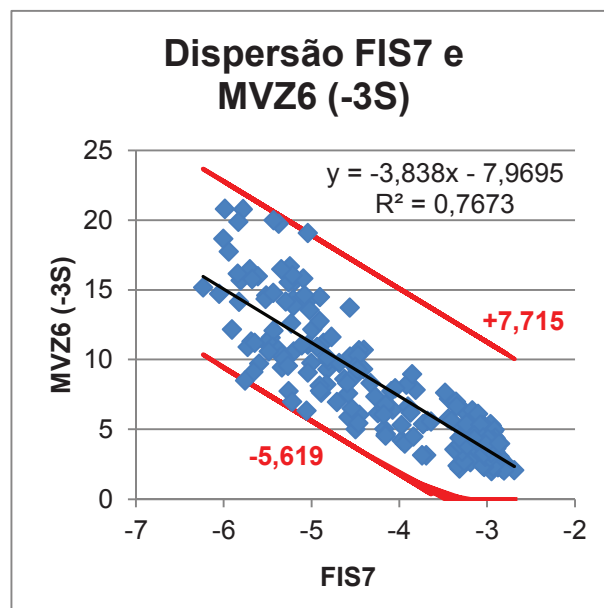


**Figura 35** – Séries históricas de FIS7, MVZ6 e MVZ6 (-3S)  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 36 e na Figura 37 são apresentados os diagramas de dispersão de FIS7 por MVZ6 e FIS7 por MVZ6 (-3S), respectivamente.



**Figura 36** – Diagrama de dispersão de FIS7 por MVZ6  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 37** – Diagrama de dispersão de FIS7 por MVZ6 (-3S)  
Fonte: Autora (2014)

Especificamente quanto à Figura 37, embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, este é o diagrama que considera a maior correlação entre as variáveis, com o grau de confiança acima do desejado. Sendo assim, toma-se a equação de regressão linear da linha de tendência como sendo a melhor reprodução da relação entre FIS7 e MVZ6 (-3S). Entretanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual a 0,7673, o que significa que o modelo consegue explicar 76,73% dos valores observados, novamente coincidindo com o modelo de FIS4 e MVZ6 (-3S). Sendo que para contemplar 100%, deve-se definir uma amplitude além da reta, que neste caso é de 7,715 cm para mais (limite máximo) e 5,619 cm para menos (limite mínimo) na equação. E ainda, no caso do limite mínimo, como não é possível leitura negativa do medidor de vazão, considera-se 0 (zero) como o menor valor aceitável.

#### 5.1.6 Correlação o termômetro TER1 e o fissurômetro FIS3

As leituras do termômetro TER1, localizado na face de jusante da barragem, e do fissurômetro FIS3, localizado na galeria inferior da barragem, foram alocados em uma única matriz. Adotando-se as médias semanais das leituras, conforme estabelecido no item 3.3.1, foram obtidos 218 pares de leituras para o cálculo de correlação.

A fim de avaliar o tempo de resposta à temperatura ambiente, medida pelo TER1, nas leituras do fissurômetro FIS3, de acordo com o descrito no item 3.3.2.3, primeiramente foram calculadas as correlações sem a determinação de atrasos ou antecipações entre os dados e na sequência calculadas as correlações considerando antecipações (1 semana por vez) para as leituras do FIS3, até que o coeficiente de correlação entre elas chegasse ao seu máximo.

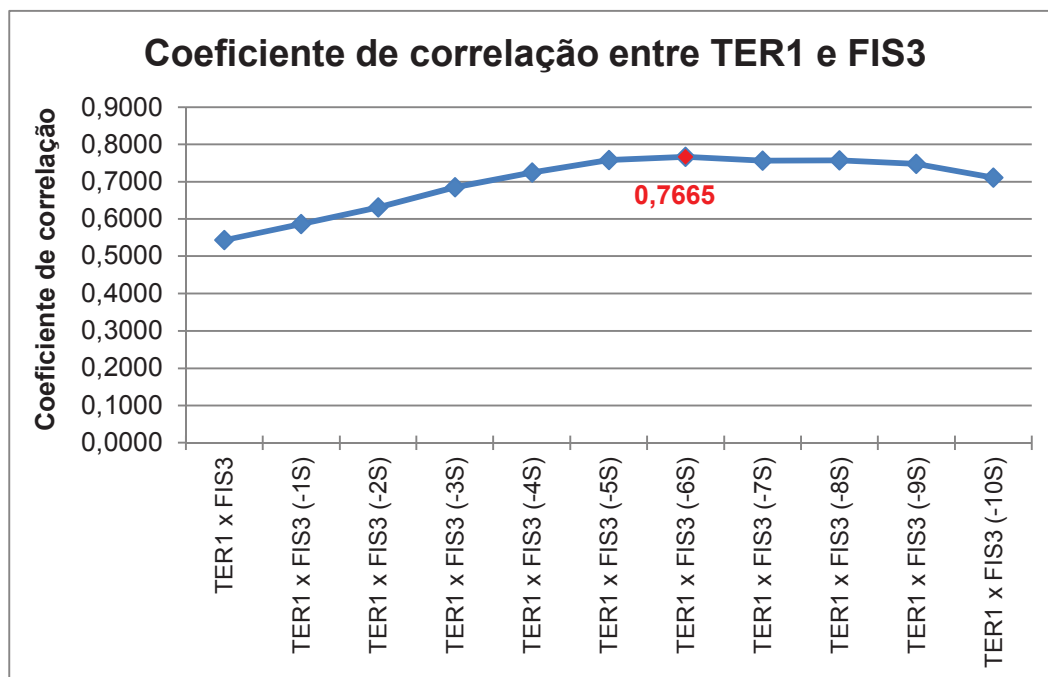
Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 16 e na Figura 38.

**Tabela 16** – Coeficientes de correlação entre TER1 e FIS3

<b>Instrumento X</b>	<b>Instrumento Y (*)</b>	<b>Coeficiente de correlação</b>	<b>Valor-p</b>
TER1	FIS3	0,5430	$4,0672 \times 10^{-18}$
TER1	FIS3 (-1S)	0,5861	$2,0681 \times 10^{-21}$
TER1	FIS3 (-2S)	0,6307	$2,3299 \times 10^{-25}$
TER1	FIS3 (-3S)	0,6848	$3,1156 \times 10^{-31}$
TER1	FIS3 (-4S)	0,7242	$3,1444 \times 10^{-36}$
TER1	FIS3 (-5S)	0,7583	$2,8904 \times 10^{-41}$
TER1	FIS3 (-6S)	0,7665	$1,8635 \times 10^{-42}$
TER1	FIS3 (-7S)	0,7563	$1,4422 \times 10^{-40}$
TER1	FIS3 (-8S)	0,7570	$1,7322 \times 10^{-40}$
TER1	FIS3 (-9S)	0,7475	$8,2444 \times 10^{-39}$
TER1	FIS3 (-10S)	0,7106	$1,9199 \times 10^{-33}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)



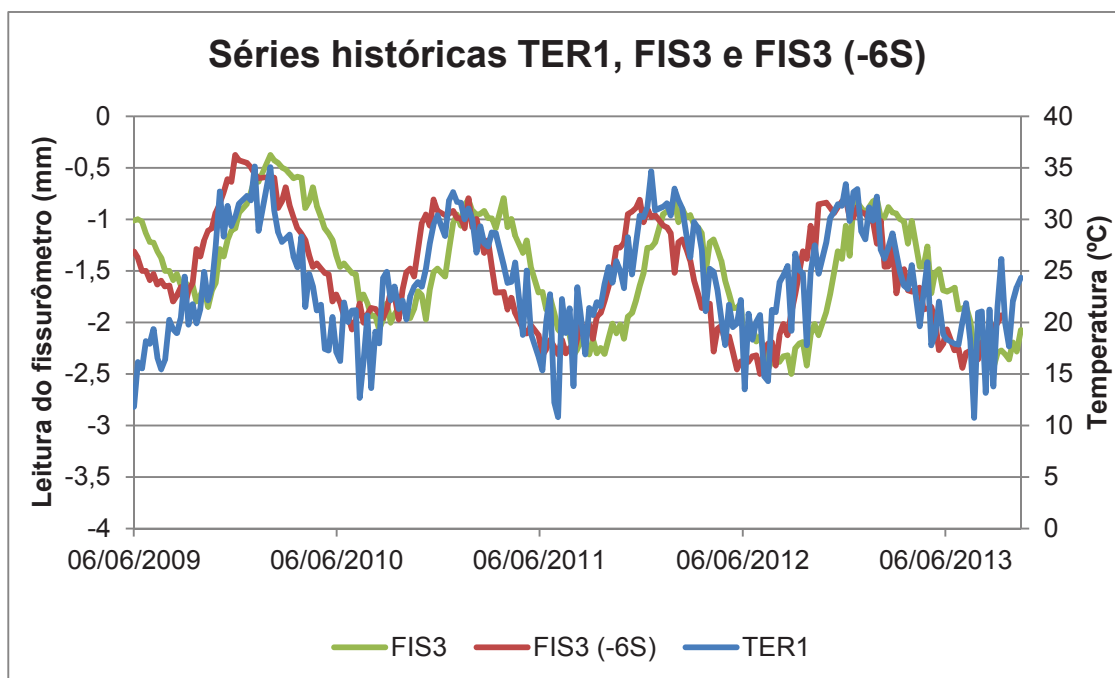
**Figura 38** – Coeficientes de correlação entre TER1 e FIS3  
Fonte: Autora (2014)

Sendo assim, verificou-se que a maior correlação entre as leituras de TER1 e FIS3 ocorre com 6 semanas de diferença, sendo, portanto, este o tempo de resposta à temperatura ambiente registrada por TER1 na leitura da abertura da fissura do bloco B-11 na galeria inferior da barragem. Sendo o coeficiente de correlação obtido igual 0,7665, considera-se, de acordo com o critério de Crespo (2009), que existe forte correlação linear positiva. Ou seja, quando maior for a temperatura, maior será a leitura no fissurômetro, o que representa fechamento da fissura, e vice versa (vide Figura 39).

Considerando-se os tempos de resposta obtidos nos itens 5.1.1 e 5.1.3 relativos às melhores correlações entre TER1 e MVZ6 (onze semanas) e entre MVZ6 e FIS3 (1 semana), respectivamente, era esperado que o tempo de resposta da melhor correlação entre TER1 e FIS3 fosse 10 semanas, que é diferença entre aqueles. Embora com dez semanas o coeficiente de correlação entre TER1 e FIS3 tenha ficado acima de 0,7, o que indica forte correlação linear, a melhor correlação foi atingida com 6 semanas de atraso. Este resultado pode ser atribuído ao fato de que existem outras variáveis além de TER1, FIS3 e MVZ6, que não foram consideradas na análise, e que podem influenciar de forma diferenciada as combinações entre TER1 e MVZ6; TER1 e FIS3; e FIS3 e MVZ6.

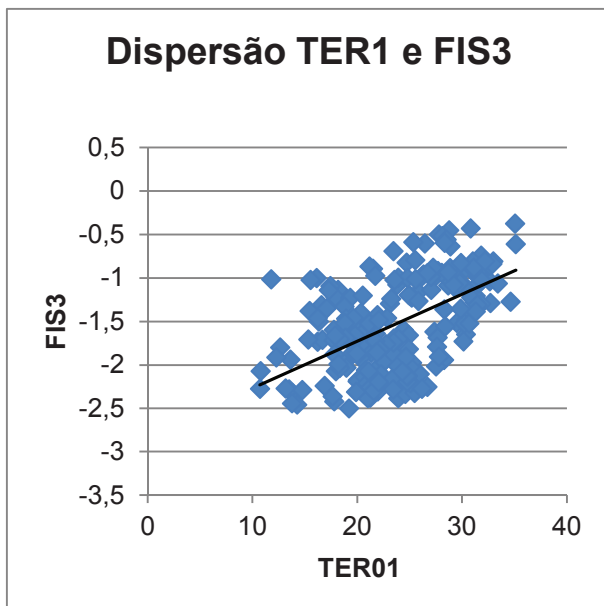
De acordo com Gujarati (2006), se pudermos explicar parte substancial do comportamento de Y com duas ou três variáveis explanatórias e se nossa teoria não for suficientemente forte para sugerir a inclusão de outras variáveis, melhor deixar que o desvio (variável aleatória não observável que assume valores positivos ou negativos) represente todas as outras variáveis.

Foi ainda verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 16.

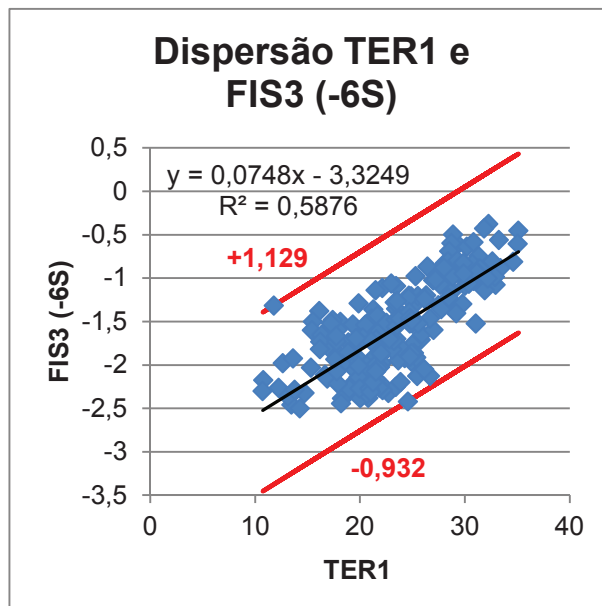


**Figura 39** – Séries históricas de TER1, FIS3 e FIS3 (-6S)  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 40 e na Figura 41 são apresentados os diagramas de dispersão de TER1 por FIS3 e TER1 por FIS3 (-6S), respectivamente.



**Figura 40** – Diagrama de dispersão de TER1 por FIS3  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 41** – Diagrama de dispersão de TER1 por FIS3 (-6S)  
Fonte: Autora (2014)

Especificamente quanto à Figura 41, embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, este é o diagrama que considera a maior correlação entre as variáveis, com o grau de confiança acima do desejado. Sendo assim, toma-se a equação de regressão linear da linha de tendência como sendo a melhor reprodução da relação entre TER1 e FIS3 (-6S). Entretanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual a 0,5876, o que significa que o modelo consegue explicar 58,76% dos valores observados. Sendo que para contemplar 100%, deve-se definir uma amplitude além da reta, que neste caso é de 1,129 mm para mais (limite máximo) e 0,932 mm para menos (limite mínimo) na equação.

#### 5.1.7 Correlação entre o termômetro TER1 e o fissurômetro FIS4

Da mesma forma que realizado para o FIS3, foram calculados os coeficientes de correlação entre as leituras do fissurômetro FIS4, localizado na galeria de drenagem superior da barragem da UHE GJR, e o termômetro TER1. Foram considerados 218 pares de leituras.

Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 17 e na Figura 42.

Tabela 17 – Coeficientes de correlação entre TER1 e FIS4

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
TER1	FIS4	0,6021	$6,8400 \times 10^{-23}$
TER1	FIS4 (-1S)	0,6251	$6,3993 \times 10^{-25}$
TER1	FIS4 (-2S)	0,6632	$9,5738 \times 10^{-29}$
TER1	FIS4 (-3S)	0,7329	$1,1630 \times 10^{-37}$
TER1	FIS4 (-4S)	0,7642	$1,9516 \times 10^{-42}$
TER1	FIS4 (-5S)	0,8000	$6,4814 \times 10^{-49}$
TER1	FIS4 (-6S)	0,8123	$2,6681 \times 10^{-51}$
TER1	FIS4 (-7S)	0,8135	$2,4356 \times 10^{-51}$
TER1	FIS4 (-8S)	0,8316	$2,6774 \times 10^{-55}$
TER1	FIS4 (-9S)	0,8423	$9,9009 \times 10^{-58}$
TER1	FIS4 (-10S)	0,8110	$4,2924 \times 10^{-50}$
TER1	FIS4 (-11S)	0,7876	$3,4021 \times 10^{-45}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)

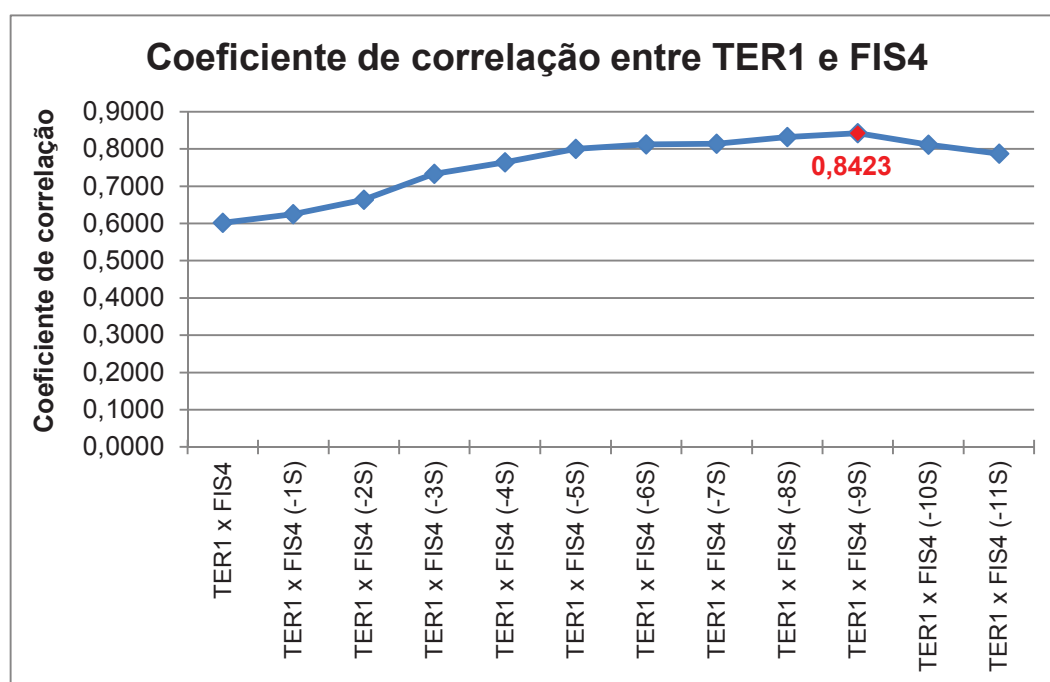


Figura 42 – Coeficientes de correlação entre TER1 e FIS4

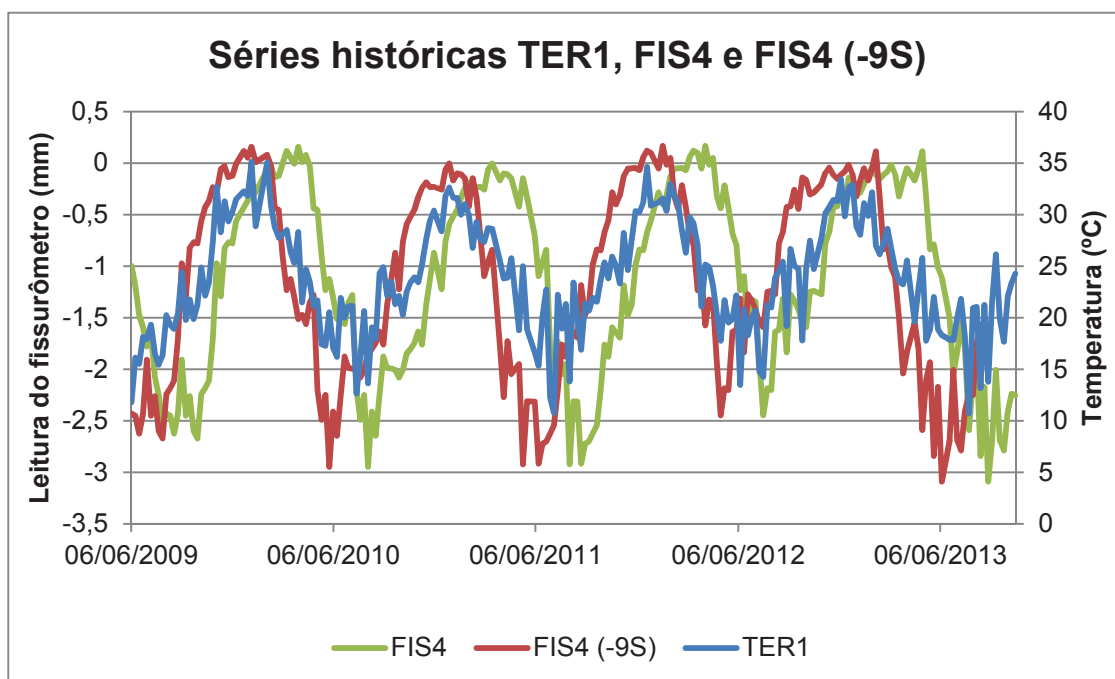
Fonte: Autora (2014)

Verificou-se, portanto, que a maior correlação entre as leituras de TER1 e FIS4 ocorre com 9 semanas de diferença, o qual é o tempo de resposta à temperatura ambiente registrada por TER1 nas leituras do fissurômetro FIS4.

Destes cálculos resultou o coeficiente de correlação igual 0,8423, que segundo o critério de Crespo (2009), representa forte correlação linear positiva. Ou seja, quanto maior for a temperatura ambiente, maior será o valor indicado no fissurômetro, o que indica maior fechamento da fissura, e vice versa (vide Figura 43).

Considerando-se os tempos de resposta obtidos nos itens 5.1.1 e 5.1.4 relativos às melhores correlações entre TER1 e MVZ6 (onze semanas) e entre MVZ6 e FIS4 (3 semanas), respectivamente, era esperado que o tempo de resposta da melhor correlação entre TER1 e FIS4 fosse 8 semanas, que é diferença entre aqueles. Embora com oito semanas o coeficiente de correlação entre TER1 e FIS4 tenha ficado acima de 0,8, o que indica forte correlação linear, a melhor correlação foi atingida com 9 semanas de atraso. Este resultado pode ser atribuído ao fato de que existem outras variáveis além de TER1, FIS4 e MVZ6, que não foram consideradas na análise, e que podem influenciar de forma diferenciada as combinações entre TER1 e MVZ6; TER1 e FIS4; e FIS4 e MVZ6.

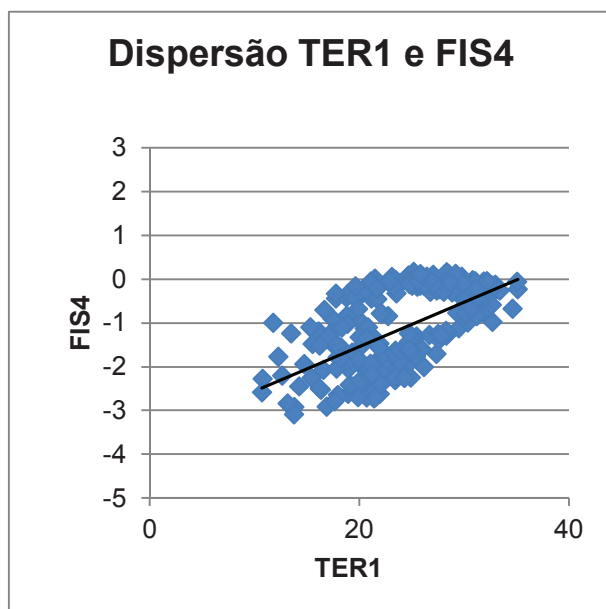
Foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 17.



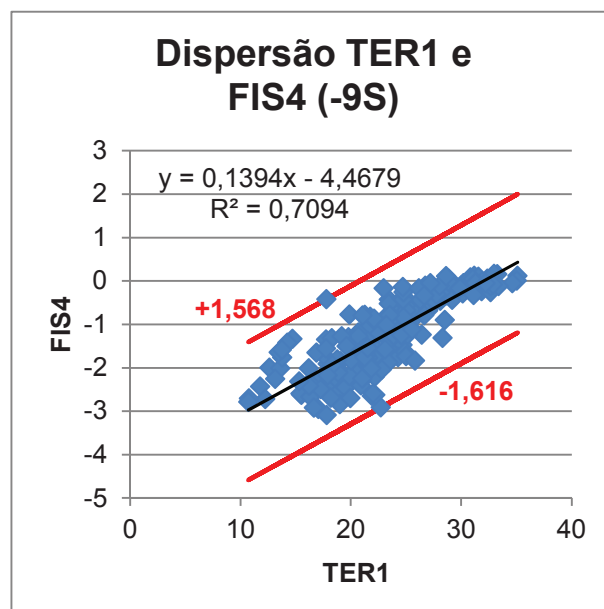
**Figura 43** – Séries históricas de TER1, FIS4 e FIS4 (-9S)  
Fonte: Autora (2014)



Na Figura 44 e na Figura 45 são apresentados os diagramas de dispersão de TER1 por FIS4 e TER1 por FIS4 (-9S), respectivamente.



**Figura 44** – Diagrama de dispersão de TER1 por FIS4  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 45** – Diagrama de dispersão de TER1 por FIS4 (-9S)  
Fonte: Autora (2014)

Especificamente quanto à Figura 45, embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, este é o diagrama que considera a maior correlação entre as variáveis, com o grau de confiança acima do desejado. Sendo assim, toma-se a equação de regressão linear da linha de tendência como sendo a melhor reprodução da relação entre TER1 e FIS4 (-9S). Entretanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual a 0,7094, o que significa que o modelo consegue explicar 70,94% dos valores observados. Sendo que para contemplar 100%, deve-se definir uma amplitude além da reta, que neste caso é de 1,568 mm para mais (limite máximo) e 1,616 mm para menos (limite mínimo) na equação.

#### 5.1.8 Correlação entre o termômetro TER1 e o fissurômetro FIS7

Da mesma forma que realizado para os FIS3 e FIS4, foram calculados os coeficientes de correlação entre as leituras do fissurômetro FIS7, localizado na crista da barragem (face montante) da UHE GJR, e o termômetro TER1. Foram considerados 214 pares de leituras.

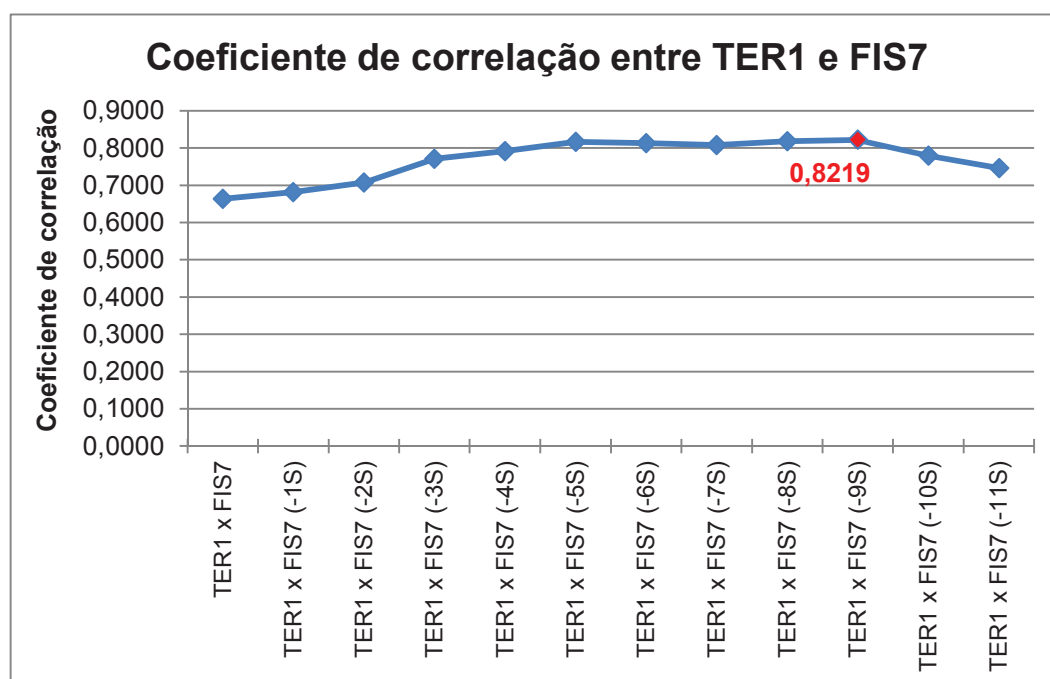
Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 18 e na Figura 46.

**Tabela 18** – Coeficientes de correlação entre TER1 e FIS7

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
TER1	FIS7	0,6632	$1,7039 \times 10^{-28}$
TER1	FIS7 (-1S)	0,6813	$2,0840 \times 10^{-30}$
TER1	FIS7 (-2S)	0,7073	$1,8087 \times 10^{-33}$
TER1	FIS7 (-3S)	0,7707	$5,6126 \times 10^{-43}$
TER1	FIS7 (-4S)	0,7913	$1,5585 \times 10^{-46}$
TER1	FIS7 (-5S)	0,8163	$1,8321 \times 10^{-51}$
TER1	FIS7 (-6S)	0,8135	$1,2736 \times 10^{-50}$
TER1	FIS7 (-7S)	0,8076	$3,8839 \times 10^{-49}$
TER1	FIS7 (-8S)	0,8184	$3,2661 \times 10^{-51}$
TER1	FIS7 (-9S)	0,8219	$9,3045 \times 10^{-52}$
TER1	FIS7 (-10S)	0,7794	$4,2812 \times 10^{-43}$
TER1	FIS7 (-11S)	0,7457	$1,8095 \times 10^{-37}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)



**Figura 46** – Coeficientes de correlação entre TER1 e FIS7

Fonte: Autora (2014)

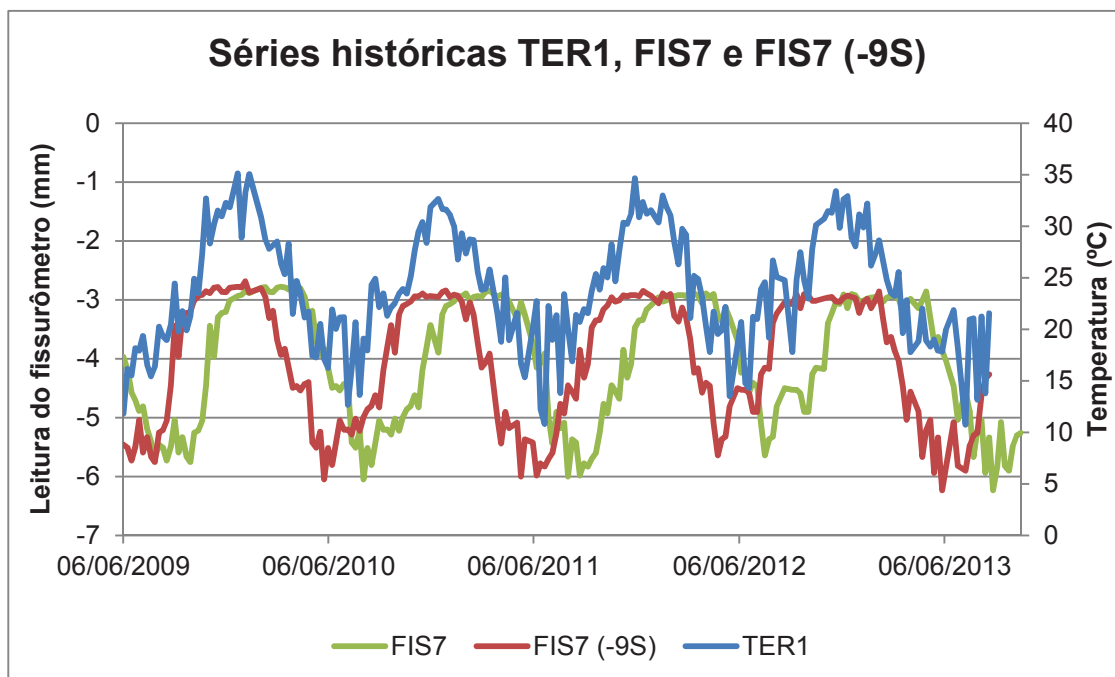
Verificou-se, portanto, que a maior correlação entre as leituras de TER1 e FIS7 ocorre com 9 semanas de diferença, o qual é o tempo de resposta à temperatura ambiente registrada por TER1 nas leituras do fissurômetro FIS7, similar ao tempo de resposta à temperatura ambiente nas leituras do fissurômetro FIS4.

Destes cálculos resultou o coeficiente de correlação igual 0,8219, que segundo o critério de Crespo (2009), representa forte correlação linear positiva. Ou seja, quanto maior for a temperatura ambiente, maior será o valor indicado no fissurômetro, o que indica maior fechamento da fissura, e vice versa (vide Figura 47).

Considerando-se os tempos de resposta obtidos nos itens 5.1.1 e 5.1.5 relativos às melhores correlações entre TER1 e MVZ6 (onze semanas) e entre MVZ6 e FIS7 (3 semanas), respectivamente, era esperado que o tempo de resposta da melhor correlação entre TER1 e FIS7 fosse 8 semanas, que é diferença entre aqueles. Embora com oito semanas o coeficiente de correlação entre TER1 e FIS7 tenha ficado acima de 0,8, o que indica forte correlação linear, a melhor correlação foi atingida com 9 semanas de atraso. Este resultado pode ser atribuído ao fato de que existem outras variáveis além de TER1, FIS7 e MVZ6, que não foram consideradas na análise, e que podem influenciar de forma diferenciada as combinações entre TER1 e MVZ6; TER1 e FIS7; e FIS7 e MVZ6.

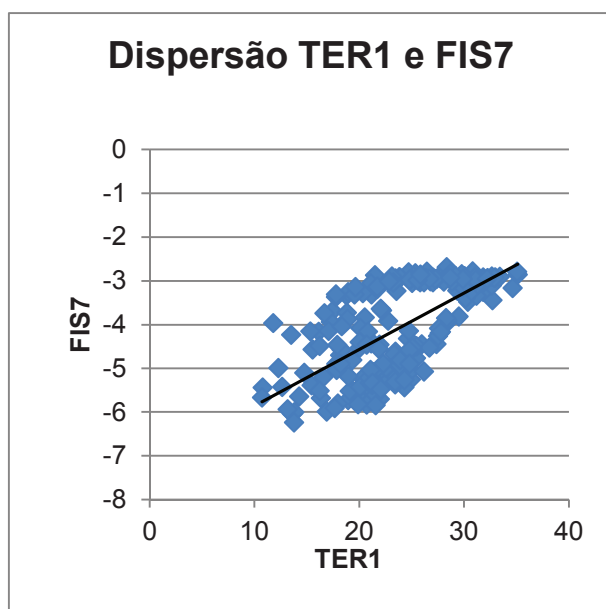
É interessante destacar que as correlações e os tempos de resposta às temperaturas ambientes (TER1 e TER2) e às leituras do medidor de vazão MVZ6, dos fissurômetros FIS4 e FIS7 são sempre semelhantes.

Foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 18.

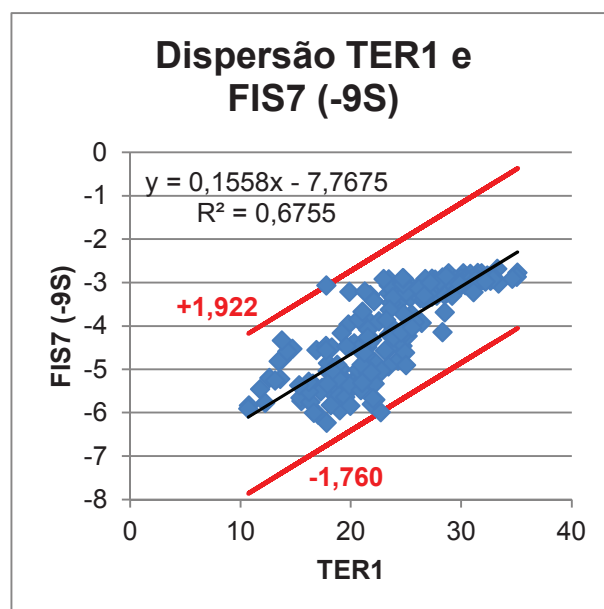


**Figura 47** – Séries históricas de TER1, FIS7 e FIS7 (-9S)  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 48 e na Figura 49 são apresentados os diagramas de dispersão de TER1 por FIS7 e TER1 por FIS7 (-9S), respectivamente.



**Figura 48** – Diagrama de dispersão de TER1 por FIS7  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 49** – Diagrama de dispersão de TER1 por FIS7 (-9S)  
Fonte: Autora (2014)

Especificamente quanto à Figura 49, embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, este é o diagrama que considera a maior correlação entre as variáveis, com o grau de confiança acima do desejado. Sendo assim, toma-se a equação de regressão linear da linha de tendência como sendo a melhor reprodução da relação entre TER1 e FIS7 (-9S). Entretanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual a 0,6755, o que significa que o modelo consegue explicar 67,55% dos valores observados. Sendo que para contemplar 100%, deve-se definir uma amplitude além da reta, que neste caso é de 1,922 mm para mais (limite máximo) e 1,760 mm para menos (limite mínimo) na equação.

#### 5.1.9 Correlação entre o termômetro TER2 e o fissurômetro FIS3

As leituras do termômetro TER2, localizado na face de montante da barragem, e do fissurômetro FIS3, localizado na galeria inferior da barragem, foram alocados em uma única matriz. Adotando-se as médias semanais das leituras, conforme estabelecido no item 3.3.1, foram obtidos 218 pares de leituras para o cálculo de correlação.

A fim de avaliar o tempo de resposta à temperatura ambiente, medida pelo TER2, nas leituras do fissurômetro FIS3, de acordo com o descrito no item 3.3.2.3, primeiramente foram calculadas as correlações sem a determinação de atrasos ou antecipações entre os dados e na sequência calculadas as correlações considerando antecipações (1 semana por vez) para as leituras do FIS3, até que o coeficiente de correlação entre elas chegasse ao seu máximo.

Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 19 e na Figura 50.

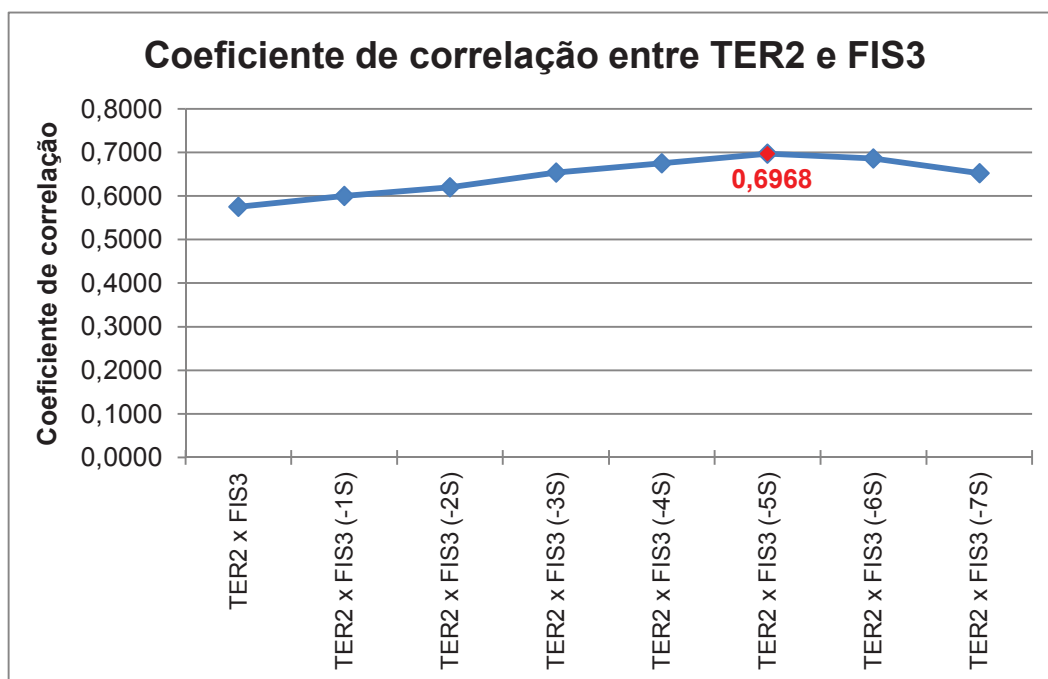
**Tabela 19** – Coeficientes de correlação entre TER2 e FIS3

<b>Instrumento X</b>	<b>Instrumento Y (*)</b>	<b>Coeficiente de correlação</b>	<b>Valor-p</b>
TER2	FIS3	0,5749	$1,4206 \times 10^{-20}$
TER2	FIS3 (-1S)	0,6000	$1,3198 \times 10^{-22}$
TER2	FIS3 (-2S)	0,6200	$2,4674 \times 10^{-24}$
TER2	FIS3 (-3S)	0,6539	$9,8767 \times 10^{-28}$
TER2	FIS3 (-4S)	0,6748	$6,3137 \times 10^{-30}$
TER2	FIS3 (-5S)	0,6968	$1,9692 \times 10^{-32}$
TER2	FIS3 (-6S)	0,6859	$5,9803 \times 10^{-31}$

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coefficiente de correlação	Valor-p
TER2	FIS3 (-7S)	0,6519	$4,9210 \times 10^{-27}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)



**Figura 50** – Coeficientes de correlação entre TER2 e FIS3  
Fonte: Autora (2014)

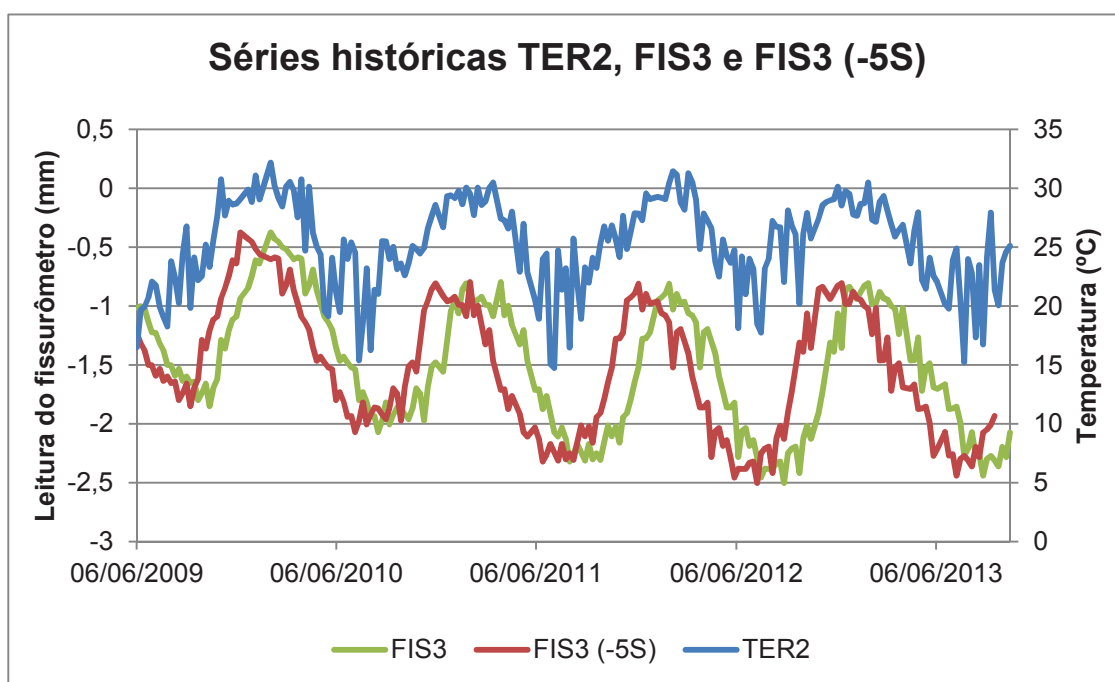
Sendo assim, verificou-se que a maior correlação entre as leituras de TER2 e FIS3 ocorre com 5 semanas de diferença, sendo, portanto, este o tempo de resposta à temperatura ambiente registrada por TER2 na leitura da abertura da fissura do bloco B-11 na galeria inferior da barragem. Sendo o coeficiente de correlação obtido igual 0,6968, considera-se, de acordo com o critério de Crespo (2009), que existe forte correlação linear positiva. Ou seja, quando maior for a temperatura, maior será a leitura no fissurômetro, o que representa fechamento da fissura, e vice versa (vide Figura 51).

Considerando-se os tempos de resposta obtidos nos itens 5.1.2 e 5.1.3 relativos às melhores correlações entre TER2 e MVZ6 (onze semanas) e entre MVZ6 e FIS3 (1 semana), respectivamente, era esperado que o tempo de resposta da melhor correlação entre TER2 e FIS3 fosse 10 semanas, que é diferença entre aqueles. Entretanto, a melhor correlação foi atingida com 5 semanas de atraso. Este

resultado pode ser atribuído ao fato de que existem outras variáveis além de TER2, FIS3 e MVZ6, que não foram consideradas na análise, e que podem influenciar de forma diferenciada as combinações entre TER2 e MVZ6; TER2 e FIS3; e FIS3 e MVZ6.

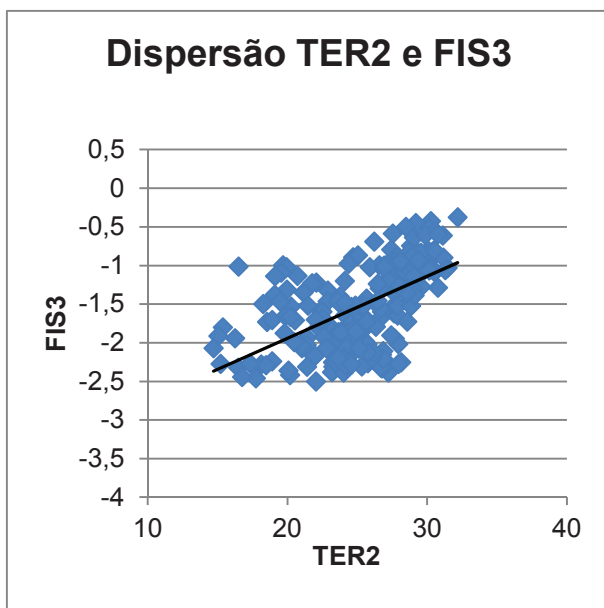
De acordo com Gujarati (2006), se pudermos explicar parte substancial do comportamento de Y com duas ou três variáveis explanatórias e se nossa teoria não for suficientemente forte para sugerir a inclusão de outras variáveis, melhor deixar que o desvio (variável aleatória não observável que assume valores positivos ou negativos) represente todas as outras variáveis.

Foi ainda verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 19.

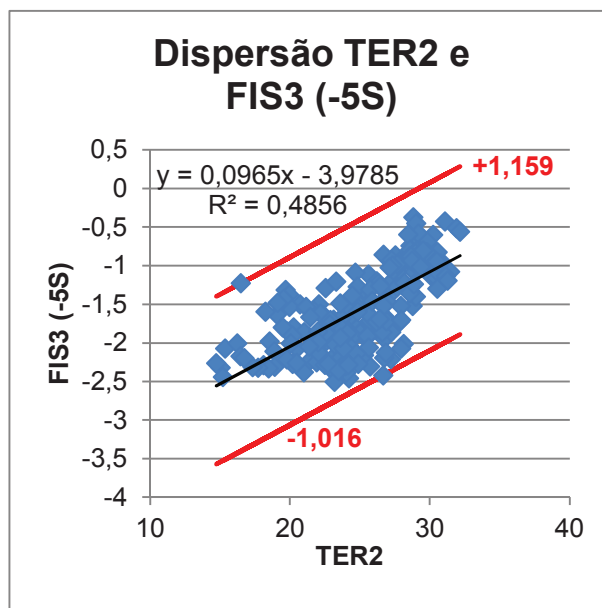


**Figura 51** – Séries históricas de TER2, FIS3 e FIS3 (-5S)  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 52 e na Figura 53 são apresentados os diagramas de dispersão de TER2 por FIS3 e TER2 por FIS3 (-5S), respectivamente.



**Figura 52** – Diagrama de dispersão de TER2 por FIS3  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 53** – Diagrama de dispersão de TER2 por FIS3 (-5S)  
Fonte: Autora (2014)

Especificamente quanto à Figura 53, embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, este é o diagrama que considera a maior correlação entre as variáveis, com o grau de confiança acima do desejado. Sendo assim, toma-se a equação de regressão linear da linha de tendência como sendo a melhor reprodução da relação entre TER2 e FIS3 (-5S). Entretanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual a 0,4856, o que significa que o modelo consegue explicar 48,56% dos valores observados. Sendo que para contemplar 100%, deve-se definir uma amplitude além da reta, que neste caso é de 1,159 mm para mais (limite máximo) e 1,016 mm para menos (limite mínimo) na equação.

#### 5.1.10 Correlação entre o termômetro TER2 e o fissurômetro FIS4

Da mesma forma que realizado para o FIS3, foram calculados os coeficientes de correlação entre as leituras do fissurômetro FIS4, localizado na galeria de drenagem superior da barragem da UHE GJR, e o termômetro TER2. Foram considerados 218 pares de leituras.

Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 20 e na Figura 54.

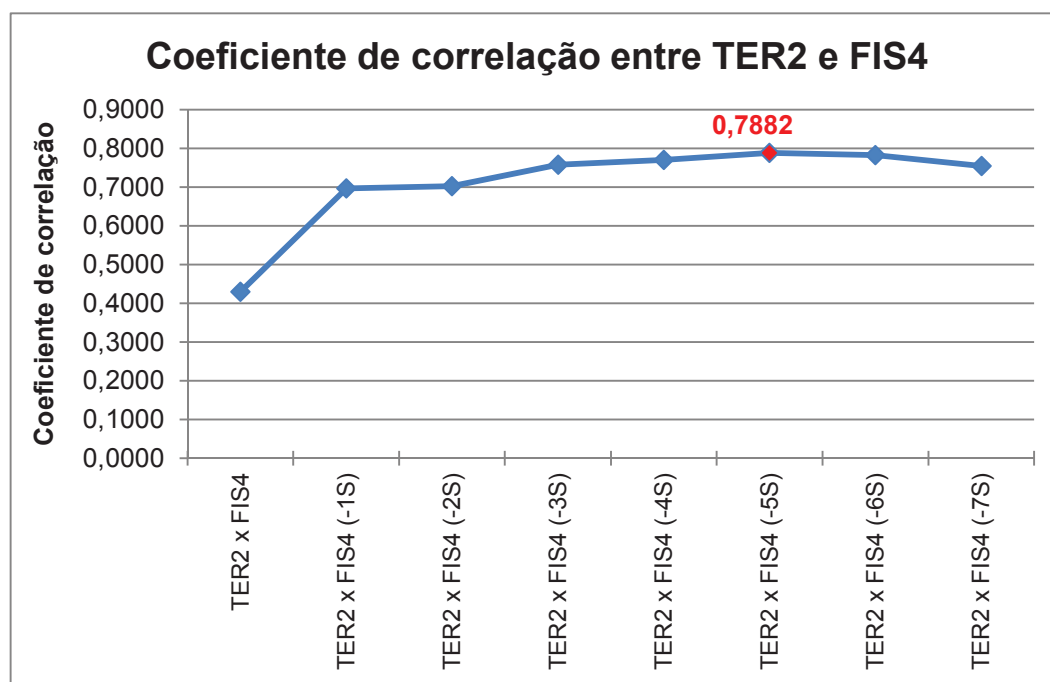


**Tabela 20** – Coeficientes de correlação entre TER2 e FIS4

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
TER2	FIS4	0,4295	$3,3870 \times 10^{-11}$
TER2	FIS4 (-1S)	0,6966	$7,6406 \times 10^{-33}$
TER2	FIS4 (-2S)	0,7028	$1,7511 \times 10^{-33}$
TER2	FIS4 (-3S)	0,7575	$1,6908 \times 10^{-41}$
TER2	FIS4 (-4S)	0,7705	$1,5443 \times 10^{-43}$
TER2	FIS4 (-5S)	0,7882	$1,4221 \times 10^{-46}$
TER2	FIS4 (-6S)	0,7825	$2,6428 \times 10^{-45}$
TER2	FIS4 (-7S)	0,7546	$2,7084 \times 10^{-40}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)

**Figura 54** – Coeficientes de correlação entre TER2 e FIS4

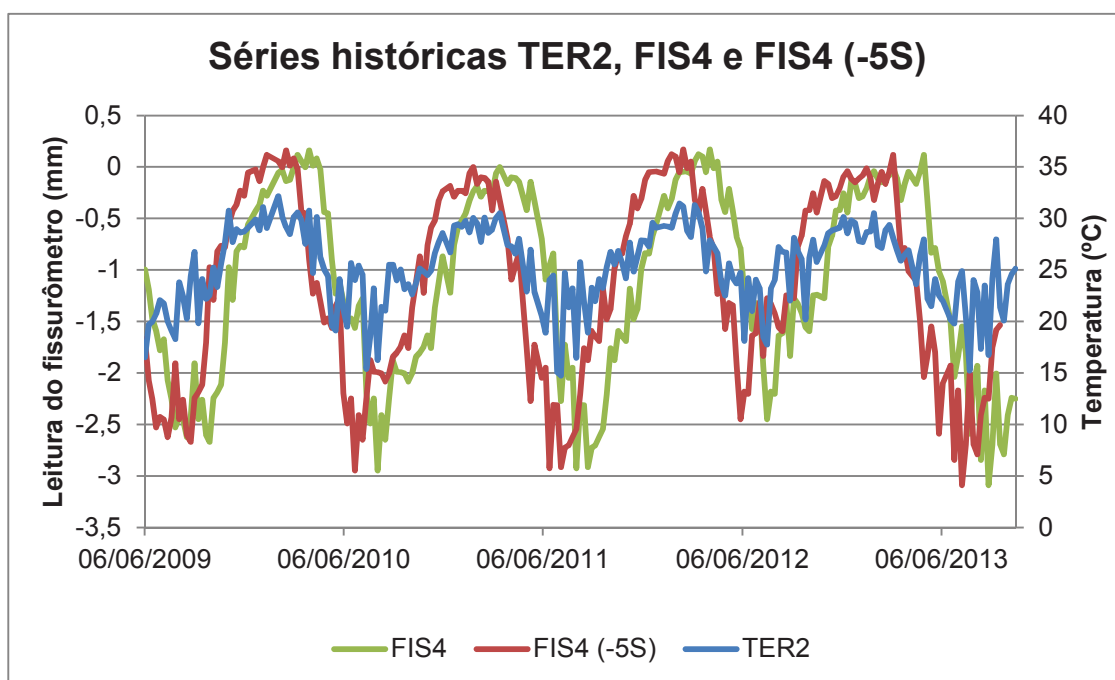
Fonte: Autora (2014)

Verificou-se, portanto, que a maior correlação entre as leituras de TER2 e FIS4 ocorre com 5 semanas de diferença, o qual é o tempo de resposta à temperatura ambiente registrada por TER2 nas leituras do fissurômetro FIS4.

Destes cálculos resultou o coeficiente de correlação igual 0,7882, que segundo o critério de Crespo (2009), representa forte correlação linear positiva. Ou seja, quanto maior for a temperatura ambiente, maior será o valor indicado no fissurômetro, o que indica maior fechamento da fissura, e vice versa (vide Figura 55).

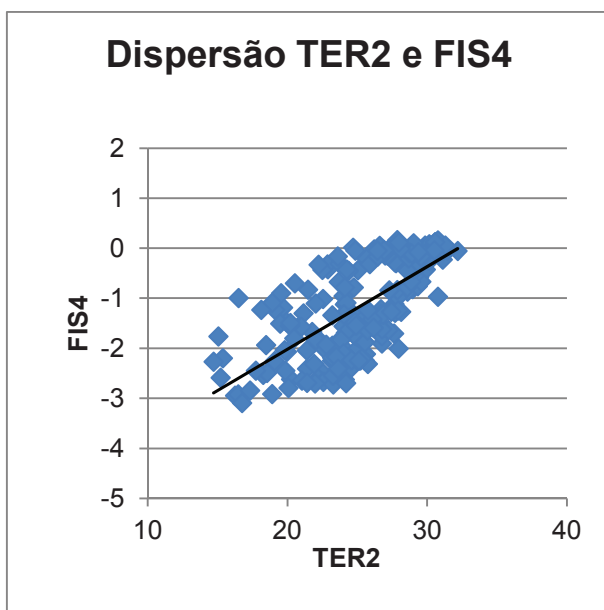
Considerando-se os tempos de resposta obtidos nos itens 5.1.2 e 5.1.4 relativos às melhores correlações entre TER2 e MVZ6 (onze semanas) e entre MVZ6 e FIS4 (3 semanas), respectivamente, era esperado que o tempo de resposta da melhor correlação entre TER2 e FIS4 fosse 8 semanas, que é diferença entre aqueles. Entretanto, a melhor correlação foi atingida com 5 semanas de atraso. Este resultado pode ser atribuído ao fato de que existem outras variáveis além de TER2, FIS4 e MVZ6, que não foram consideradas na análise, e que podem influenciar de forma diferenciada as combinações entre TER2 e MVZ6; TER2 e FIS4; e FIS4 e MVZ6.

Foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 20.

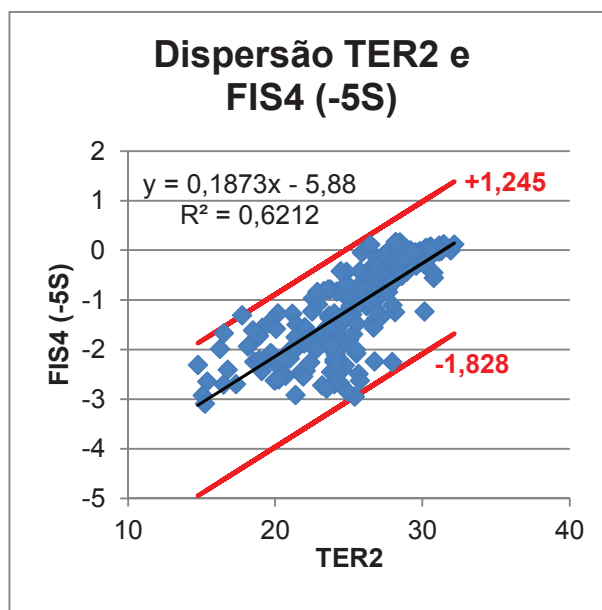


**Figura 55** – Séries históricas de TER2, FIS4 e FIS4 (-5S)  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 56 e na Figura 57 são apresentados os diagramas de dispersão de TER2 por FIS4 e TER2 por FIS4 (-5S), respectivamente. Embora não se aproximem de uma reta perfeita, sabe-se o nível de correlação e o grau de confiança em tomar a equação de regressão linear como verdadeira.



**Figura 56** – Diagrama de dispersão de TER2 por FIS4  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 57** – Diagrama de dispersão de TER2 por FIS4 (-5S)  
Fonte: Autora (2014)

Especificamente quanto à Figura 57, embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, este é o diagrama que considera a maior correlação entre as variáveis, com o grau de confiança acima do desejado. Sendo assim, toma-se a equação de regressão linear da linha de tendência como sendo a melhor reprodução da relação entre TER2 e FIS4 (-5S). Entretanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual a 0,6212, o que significa que o modelo consegue explicar 62,12% dos valores observados. Sendo que para contemplar 100%, deve-se definir uma amplitude além da reta, que neste caso é de 1,245 mm para mais (limite máximo) e 1,828 mm para menos (limite mínimo) na equação.

#### 5.1.11 Correlação entre o termômetro TER2 e o fissurômetro FIS7

Da mesma forma que realizado para os FIS3 e FIS4, foram calculados os coeficientes de correlação entre as leituras do fissurômetro FIS7, localizado na crista da barragem (face montante) da UHE GJR, e o termômetro TER2. Foram considerados 214 pares de leituras.

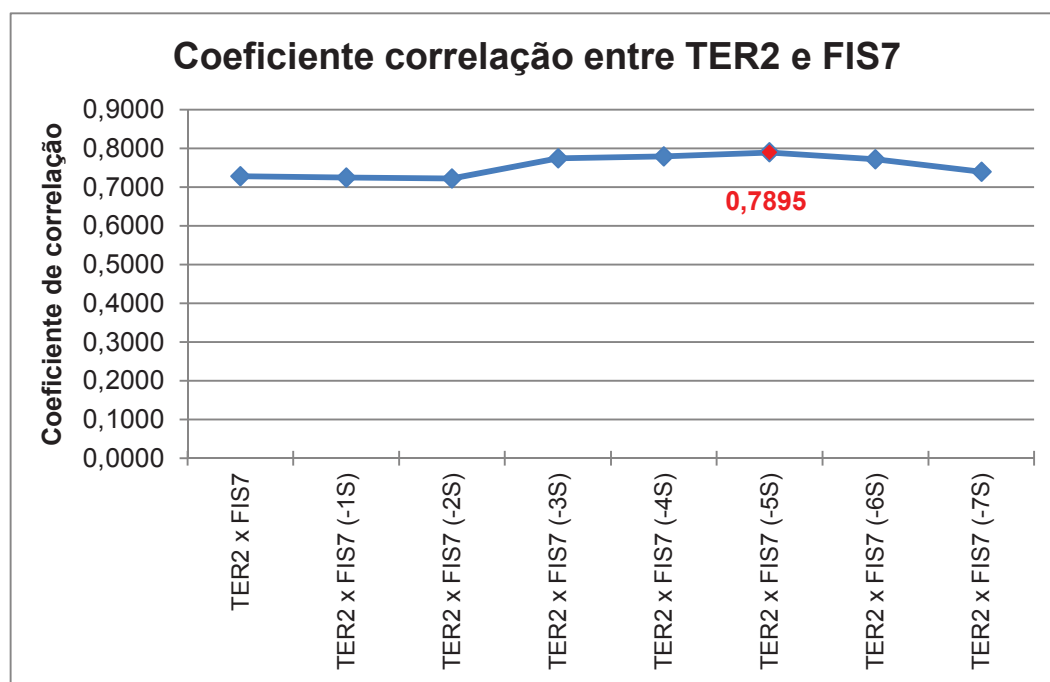
Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 21 e na Figura 58.

**Tabela 21** – Coeficientes de correlação entre TER2 e FIS7

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
TER2	FIS7	0,7280	$1,3115 \times 10^{-36}$
TER2	FIS7 (-1S)	0,7246	$5,7613 \times 10^{-36}$
TER2	FIS7 (-2S)	0,7224	$1,7249 \times 10^{-35}$
TER2	FIS7 (-3S)	0,7746	$1,1548 \times 10^{-43}$
TER2	FIS7 (-4S)	0,7793	$2,6190 \times 10^{-44}$
TER2	FIS7 (-5S)	0,7895	$5,5970 \times 10^{-46}$
TER2	FIS7 (-6S)	0,7719	$1,3616 \times 10^{-42}$
TER2	FIS7 (-7S)	0,7393	$3,1780 \times 10^{-37}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)

**Figura 58** – Coeficientes de correlação entre TER2 e FIS7

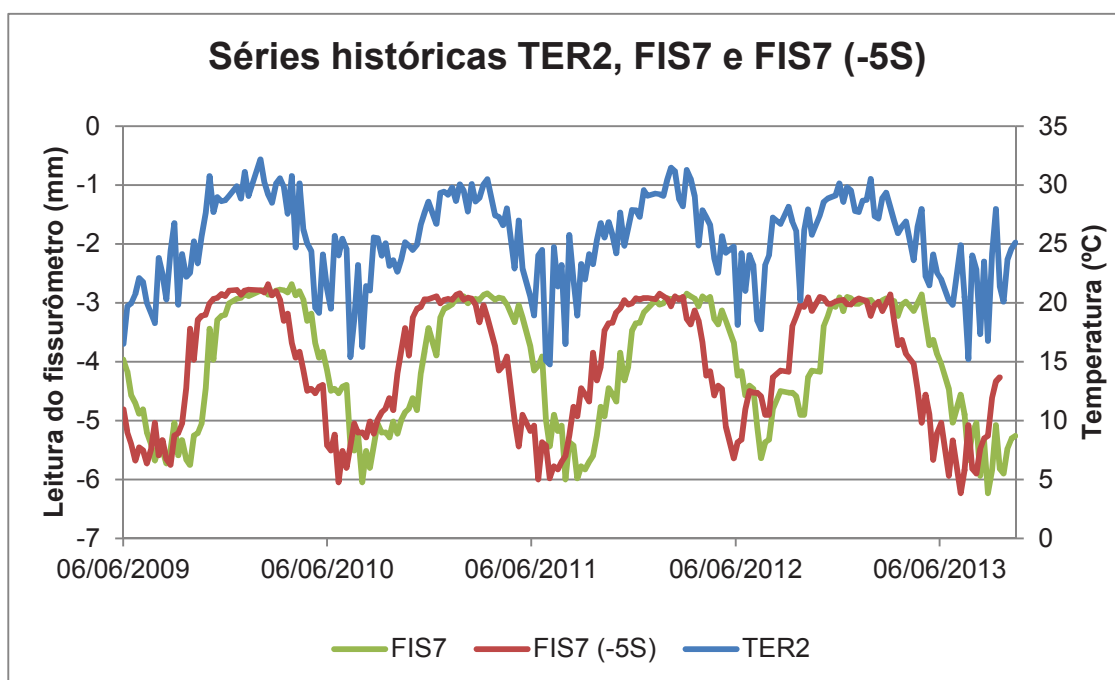
Fonte: Autora (2014)

Verificou-se, portanto, que a maior correlação entre as leituras de TER2 e FIS7 ocorre com 5 semanas de diferença, o mesmo tempo de resposta à temperatura ambiente registrada por TER2 nas leituras dos fissurômetros FIS3 e FIS4.

Destes cálculos resultou o coeficiente de correlação igual 0,7895, que segundo o critério de Crespo (2009), representa forte correlação linear positiva. Ou seja, quanto maior for a temperatura ambiente, maior será o valor indicado no fissurômetro, o que indica maior fechamento da fissura, e vice versa (vide Figura 59).

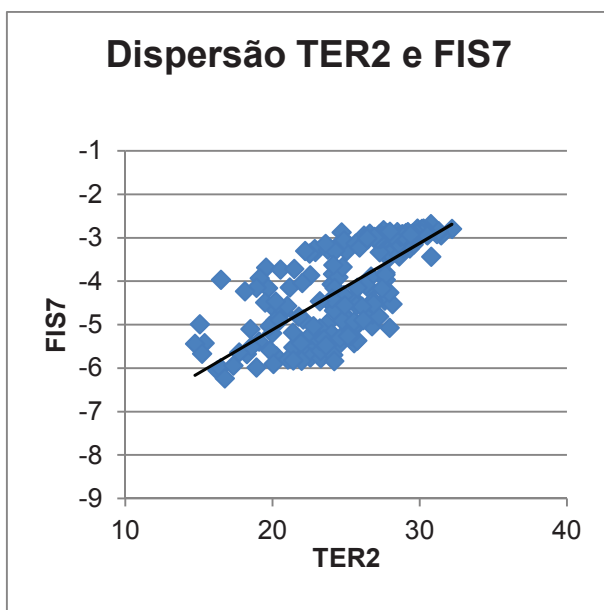
Considerando-se os tempos de resposta obtidos nos itens 5.1.2 e 5.1.5 relativos às melhores correlações entre TER2 e MVZ6 (onze semanas) e entre MVZ6 e FIS7 (3 semanas), respectivamente, era esperado que o tempo de resposta da melhor correlação entre TER2 e FIS7 fosse 8 semanas, que é diferença entre aqueles. Entretanto, a melhor correlação foi atingida com 9 semanas de atraso. Este resultado pode ser atribuído ao fato de que existem outras variáveis além de TER2, FIS7 e MVZ6, que não foram consideradas na análise, e que podem influenciar de forma diferenciada as combinações entre TER2 e MVZ6; TER2 e FIS7; e FIS7 e MVZ6.

Foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 21.

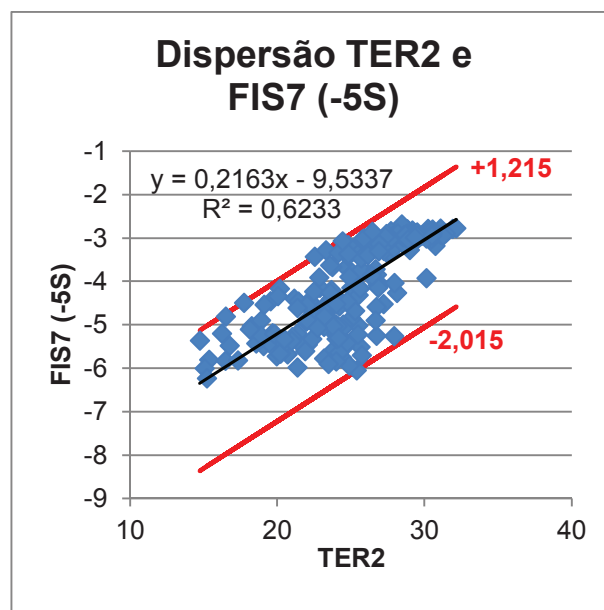


**Figura 59** – Séries históricas de TER2, FIS7 e FIS7 (-5S)  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 60 e na Figura 61 são apresentados os diagramas de dispersão de TER2 por FIS7 e TER2 por FIS7 (-5S), respectivamente. Embora não se aproximem de uma reta perfeita, sabe-se o nível de correlação e o grau de confiança em tomar a equação de regressão linear como verdadeira.



**Figura 60** – Diagrama de dispersão de TER2 por FIS7  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 61** – Diagrama de dispersão de TER2 por FIS7 (-5S)  
Fonte: Autora (2014)

Especificamente quanto à Figura 61, embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, este é o diagrama que considera a maior correlação entre as variáveis, com o grau de confiança acima do desejado. Sendo assim, toma-se a equação de regressão linear da linha de tendência como sendo a melhor reprodução da relação entre TER2 e FIS7 (-5S). Entretanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual a 0,6233, o que significa que o modelo consegue explicar 62,33% dos valores observados. Sendo que para contemplar 100%, deve-se definir uma amplitude além da reta, que neste caso é de 1,215 mm para mais (limite máximo) e 2,015 mm para menos (limite mínimo) na equação.

#### 5.1.12 Correlação entre o termômetro TER1 e o termômetro TER2

As leituras dos dois termômetros TER1 e TER2, localizados na face de jusante e na face de montante da barragem, respectivamente, também foram alocados em uma única matriz para verificação da correlação e da existência de algum tempo de resposta entre eles. Adotando-se as médias semanais das leituras, conforme estabelecido no item 3.3.1, foram obtidos 227 pares de leituras para o cálculo de correlação.

Conforme descrito no item 3.3.2.3, primeiramente foram calculadas as correlações sem a determinação de atrasos ou antecipações entre os dados e na sequência calculadas as correlações considerando a antecipação de 1 semana (-1S) nas leituras do TER2 e depois o atraso de 1 semana (+1S) nas leituras do TER2, a fim de verificar o máximo coeficiente de correlação.

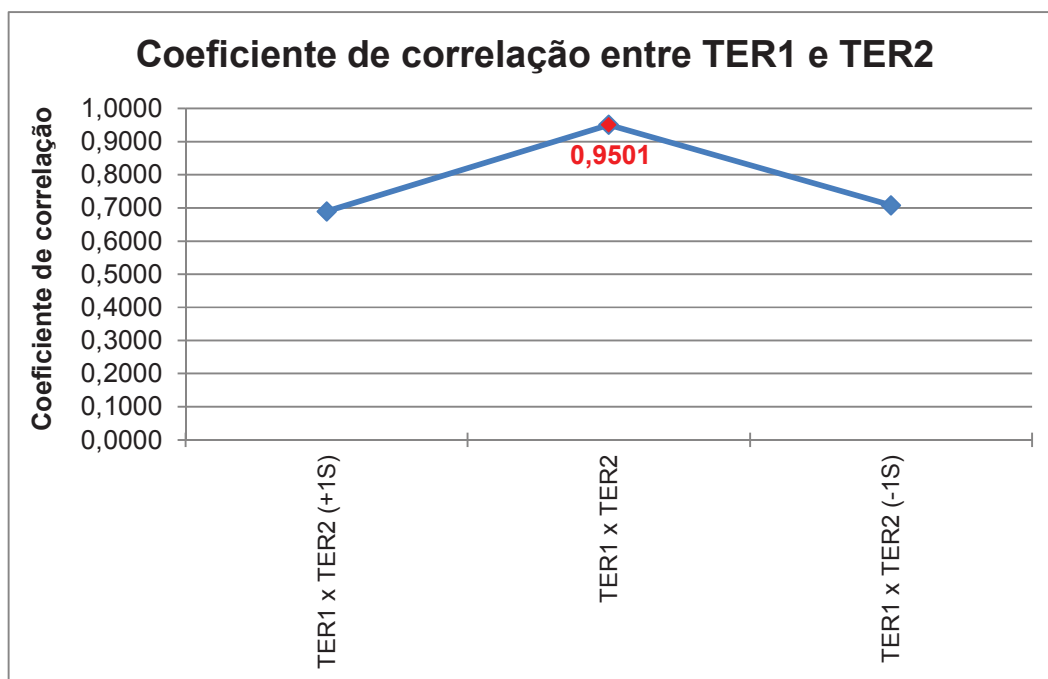
Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 22 e na Figura 62.

**Tabela 22** – Coeficientes de correlação entre TER1 e TER2

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
TER1	TER2 (+1S)	0,6890	$7,0419 \times 10^{-33}$
TER1	TER2	0,9501	$8,5772 \times 10^{-116}$
TER1	TER2 (-1S)	0,7072	$2,8058 \times 10^{-35}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)



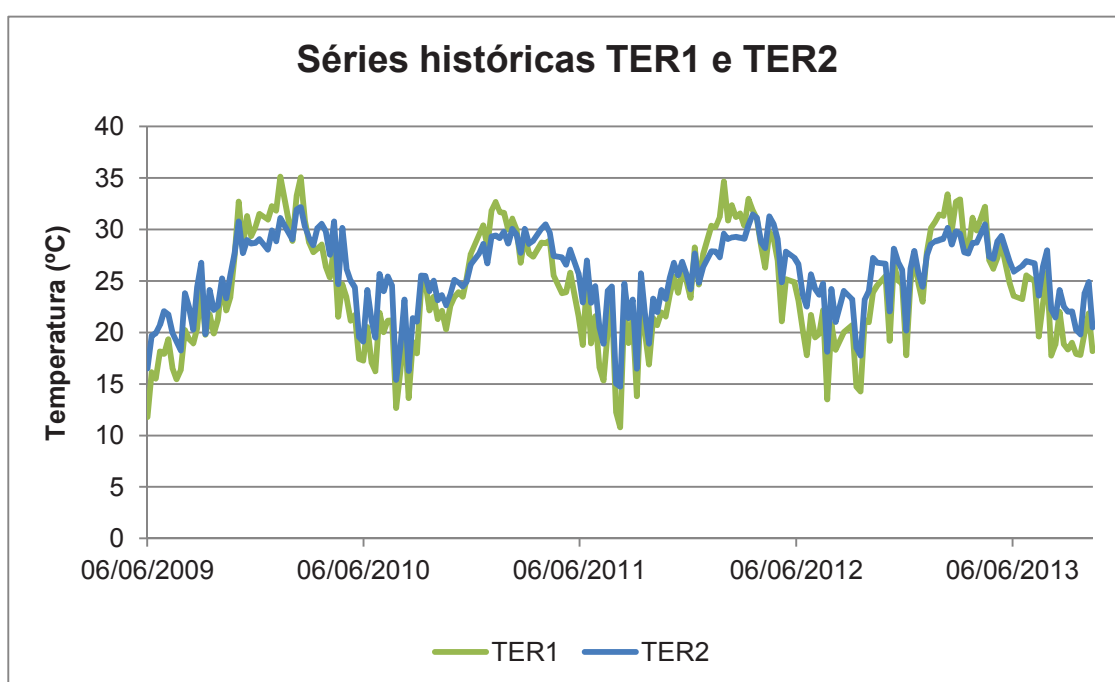
**Figura 62** – Coeficientes de correlação entre TER1 e TER2

Fonte: Autora (2014)

Sendo assim, verificou-se que a maior correlação entre as leituras de TER1 e TER2 ocorre sem semanas de diferença, como já esperado para dois instrumentos do mesmo tipo, localizados muito próximos.

O coeficiente de correlação obtido é igual a 0,9501, o que, de acordo com os critérios de Crespo (2009) e Martins e Domingues (2011), significa que existe muito forte correlação linear positiva. Ou seja, os picos de leitura de ambos termômetros ocorrem juntos (vide Figura 63).

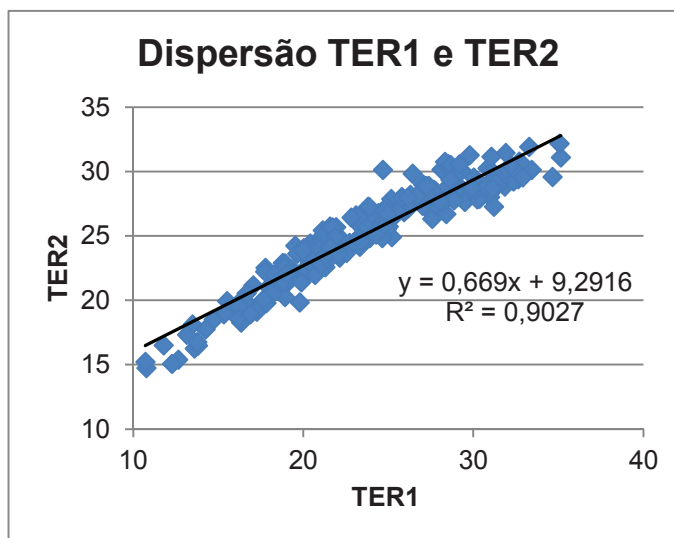
E ainda, foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 22.



**Figura 63** – Séries históricas de TER1 e TER2  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 64 é apresentado o diagrama de dispersão de TER1 por TER2. Dado o alto coeficiente de correlação e consequentemente o alto grau de confiança (valor-p muito próximo a zero), o diagrama de dispersão se aproxima de uma reta e a equação de regressão linear pode ser considerada confiável, até porque o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) resultou em 0,9027, o que significa que o modelo consegue explicar 90,27% dos valores observados.





**Figura 64** – Diagrama de dispersão de TER1 por TER2  
Fonte: Autora (2014)

#### 5.1.13 Correlação entre o fissurômetro FIS3 e o fissurômetro FIS4

Da mesma forma que realizado para os termômetros, foram verificadas as correlações entre os fissurômetros.

As leituras dos fissurômetros FIS3 e FIS4, localizados nas galerias de drenagem inferior e superior, respectivamente, foram alocados em uma única matriz. Adotando-se as médias semanais das leituras, conforme estabelecido no item 3.3.1, foram obtidos 221 pares de leituras para o cálculo de correlação.

Para verificação da existência de tempo de resposta entre eles, primeiramente foram calculadas as correlações sem a determinação de atrasos ou antecipações entre os dados e na sequência calculadas as correlações considerando a antecipação de 1 semana (-1S) e 2 semanas (-2S) nas leituras do FIS4 e depois o atraso de 1 semana (+1S) e 2 semanas (+2S) nas leituras do FIS4, a fim de verificar o máximo coeficiente de correlação.

Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 23 e na Figura 65.

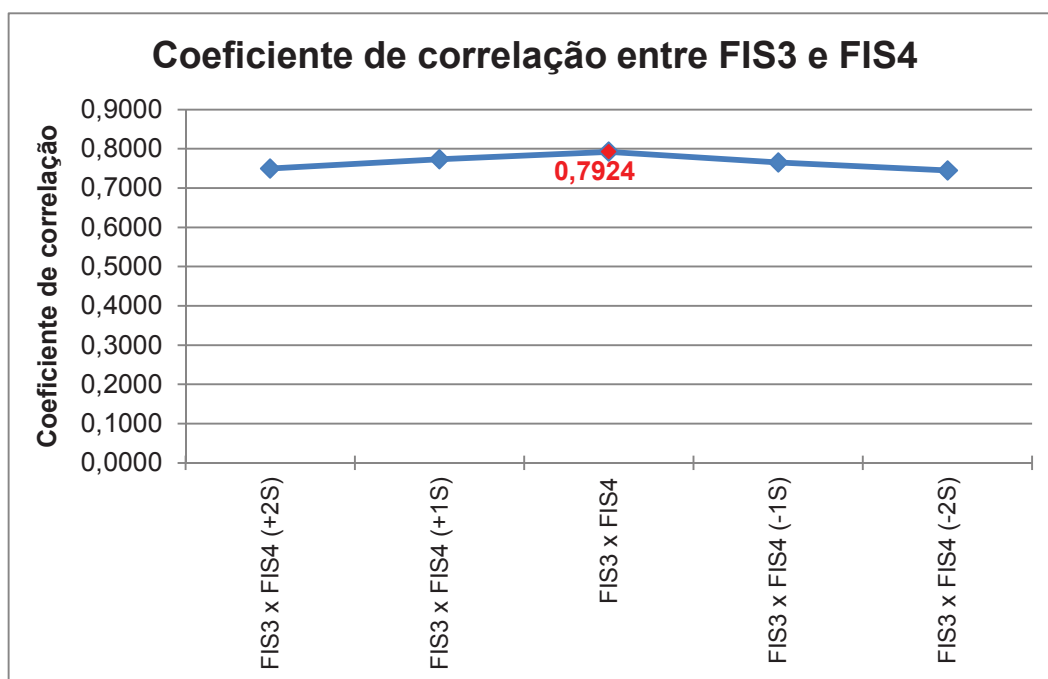
**Tabela 23** – Coeficientes de correlação entre FIS3 e FIS4

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
FIS3	FIS4 (+2S)	0,7496	$8,9287 \times 10^{-39}$
FIS3	FIS4 (+1S)	0,7735	$4,5603 \times 10^{-43}$
FIS3	FIS4	0,7924	$6,6376 \times 10^{-49}$

Instrumento X	Instrumento Y (*)	Coefficiente de correlação	Valor-p
FIS3	FIS4 (-1S)	0,7651	$1,2404 \times 10^{-41}$
FIS3	FIS4 (-2S)	0,7446	$5,0879 \times 10^{-38}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)

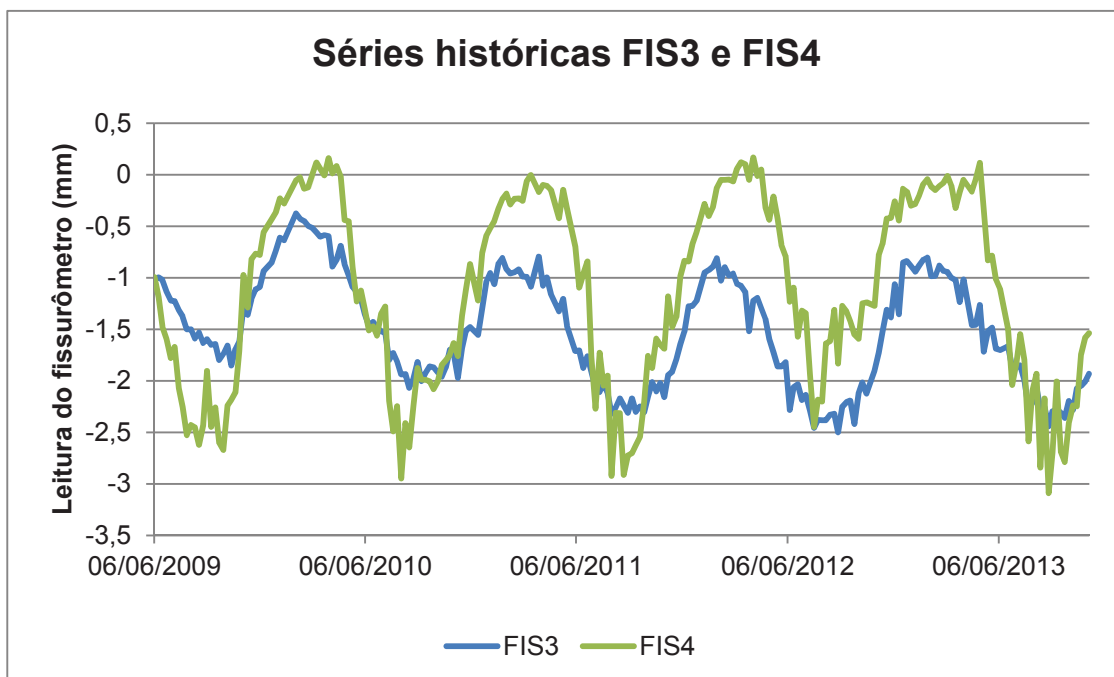


**Figura 65** – Coeficientes de correlação entre FIS3 e FIS4  
Fonte: Autora (2014)

Sendo assim, verificou-se que a maior correlação entre as leituras de FIS3 e FIS4 ocorre sem semanas de diferença, como já esperado para dois instrumentos do mesmo tipo, localizados na mesma fissura.

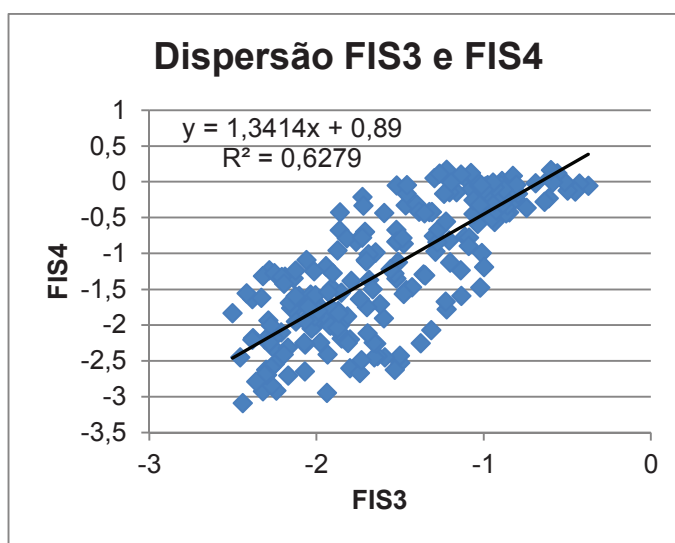
O coeficiente de correlação obtido é igual a 0,7924, o que, de acordo com o critério de Crespo (2009), significa que existe forte correlação linear positiva. Ou seja, os picos de leitura de ambos fissurômetros ocorrem juntos (vide Figura 66).

E ainda, foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 23.



**Figura 66** – Séries históricas de FIS3 e FIS4  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 67 é apresentado o diagrama de dispersão de FIS3 por FIS4. Embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, sabe-se o nível de correlação e o grau de confiança em tomar a equação de regressão linear como a mais representativa da relação entre as duas variáveis. Porém o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) resultou em 0,6279, o que significa que o modelo consegue explicar 62,79% dos valores observados.



**Figura 67** – Diagrama de dispersão de FIS3 por FIS4  
Fonte: Autora (2014)

#### 5.1.14 Correlação entre o fissurômetro FIS3 e o fissurômetro FIS7

As leituras dos fissurômetros FIS3 e FIS7, localizados na galeria de drenagem inferior e na crista da barragem, respectivamente, também foram alocados em uma única matriz. Adotando-se as médias semanais das leituras, conforme estabelecido no item 3.3.1, foram obtidos 217 pares de leituras para o cálculo de correlação.

Para verificação da existência de tempo de resposta entre eles, primeiramente foram calculadas as correlações sem a determinação de atrasos ou antecipações entre os dados e na sequência calculadas as correlações considerando a antecipação de 1 semana (-1S) nas leituras do FIS7 e depois o atraso de 1 semana (+1S) nas leituras do FIS7, a fim de verificar o máximo coeficiente de correlação.

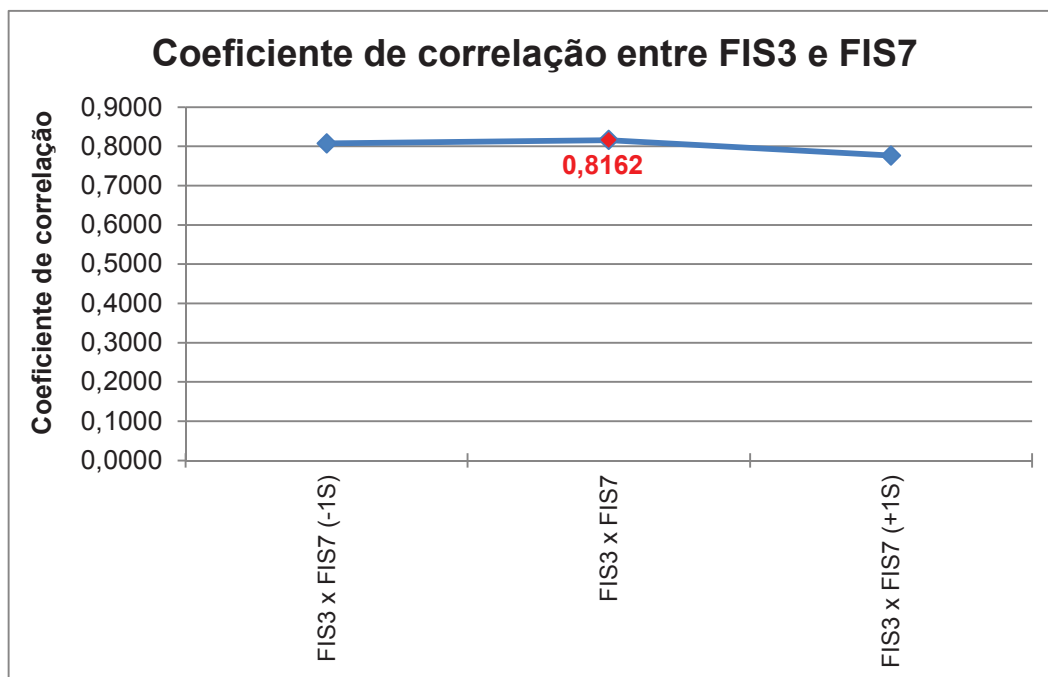
Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 24 e na Figura 68.

**Tabela 24** – Coeficientes de correlação entre FIS3 e FIS7

<b>Instrumento X</b>	<b>Instrumento Y (*)</b>	<b>Coeficiente de correlação</b>	<b>Valor-p</b>
FIS3	FIS7 (+1S)	0,8074	$1,2175 \times 10^{-48}$
FIS3	FIS7	0,8162	$4,0450 \times 10^{-53}$
FIS3	FIS7 (-1S)	0,7763	$9,2157 \times 10^{-43}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)

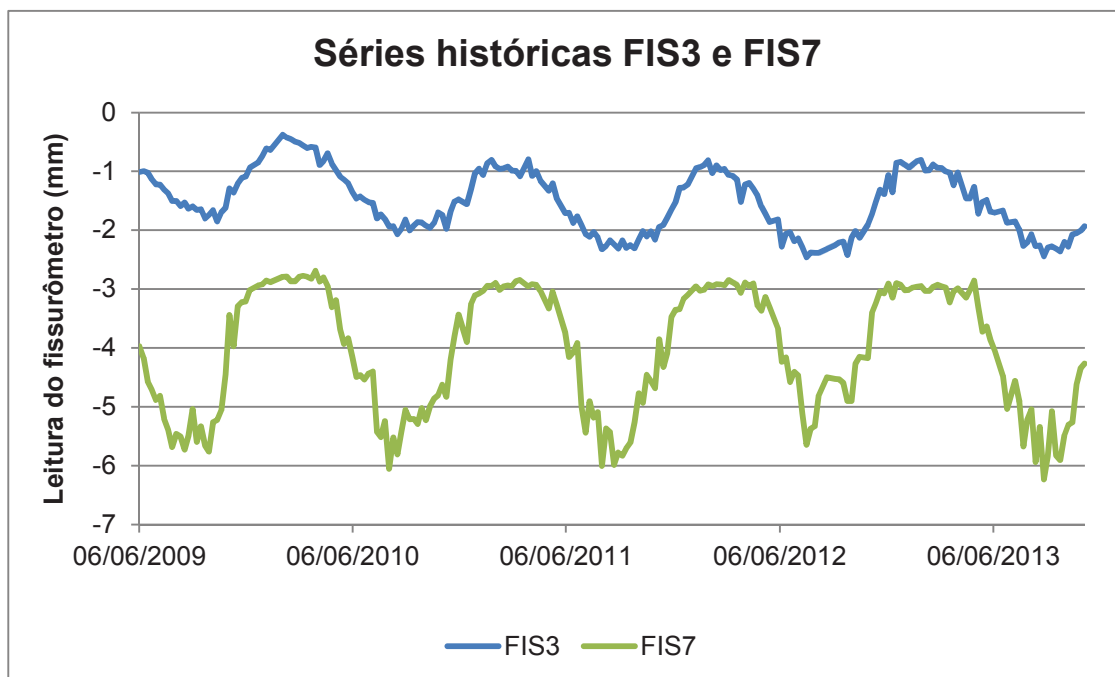


**Figura 68** – Coeficientes de correlação entre FIS3 e FIS7  
 Fonte: Autora (2014)

Sendo assim, verificou-se que a maior correlação entre as leituras de FIS3 e FIS7 também ocorre sem semanas de diferença, como já esperado para dois instrumentos do mesmo tipo, localizados na mesma fissura.

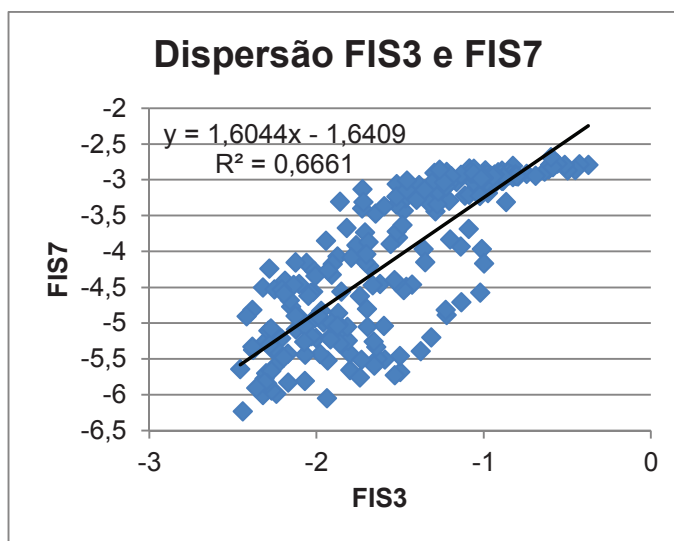
O coeficiente de correlação obtido é igual a 0,8162, o que, de acordo com o critério de Crespo (2009), significa que existe forte correlação linear positiva. Ou seja, os picos de leitura de ambos fissurômetros ocorrem juntos (vide Figura 69).

E ainda, foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 24.



**Figura 69** – Séries históricas de FIS3 e FIS7  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 70 é apresentado o diagrama de dispersão de FIS3 por FIS7. Embora os pontos não se aproximem de uma reta perfeita, sabe-se o nível de correlação e o grau de confiança em tomar a equação de regressão linear como a mais representativa da relação entre as duas variáveis. Porém o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) resultou em 0,6661, o que significa que o modelo consegue explicar 66,61% dos valores observados.



**Figura 70** – Diagrama de dispersão de FIS3 por FIS7  
Fonte: Autora (2014)

### 5.1.15 Correlação entre o fissurômetro FIS4 e o fissurômetro FIS7

As leituras dos fissurômetros FIS4 e FIS7, localizados na galeria de drenagem superior e na crista da barragem, respectivamente, também foram alocados em uma única matriz. Adotando-se as médias semanais das leituras, conforme estabelecido no item 3.3.1, foram obtidos 217 pares de leituras para o cálculo de correlação.

Para verificação da existência de tempo de resposta entre eles, primeiramente foram calculadas as correlações sem a determinação de atrasos ou antecipações entre os dados e na sequência calculadas as correlações considerando a antecipação de 1 semana (-1S) nas leituras do FIS7 e depois o atraso de 1 semana (+1S) nas leituras do FIS7, a fim de verificar o máximo coeficiente de correlação.

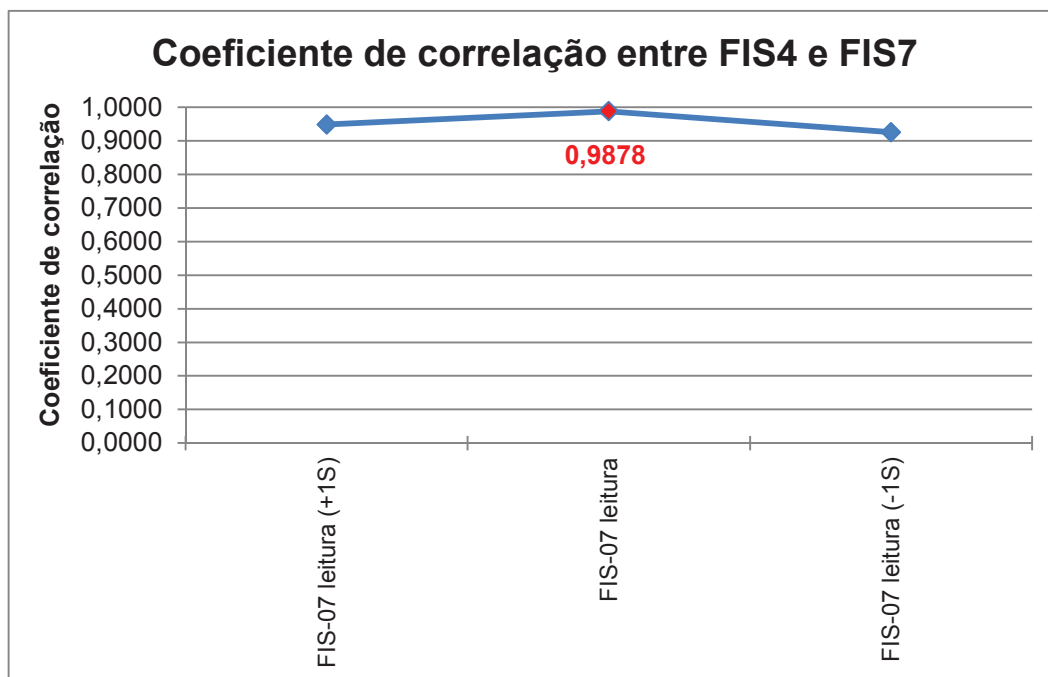
Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 25 e na Figura 71.

**Tabela 25** – Coeficientes de correlação entre FIS4 e FIS7

<b>Instrumento X</b>	<b>Instrumento Y (*)</b>	<b>Coeficiente de correlação</b>	<b>Valor-p</b>
FIS4	FIS7 (+1S)	0,9486	$7,2511 \times 10^{-104}$
FIS4	FIS7	0,9878	$1,7387 \times 10^{-175}$
FIS4	FIS7 (-1S)	0,9257	$4,2570 \times 10^{-88}$

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)



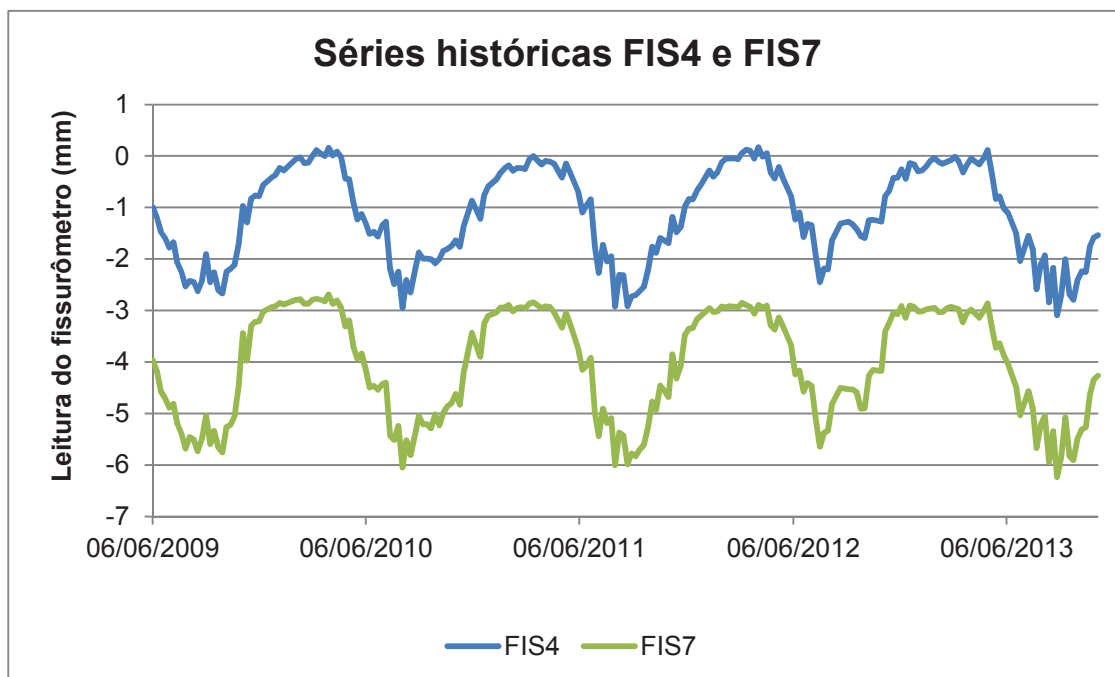
**Figura 71** – Coeficientes de correlação entre FIS4 e FIS7  
 Fonte: Autora (2014)

Sendo assim, verificou-se que a maior correlação entre as leituras de FIS4 e FIS7 também ocorre sem semanas de diferença, como já esperado para dois instrumentos do mesmo tipo, localizados na mesma fissura.

O coeficiente de correlação obtido é igual a 0,9878, o maior encontrado em toda a pesquisa. De acordo com os critérios de Crespo (2009) e Martins e Domingues (2011), este coeficiente significa que existe muito forte correlação linear positiva. Ou seja, os picos de leitura de ambos fissurômetros ocorrem juntos (vide Figura 72).

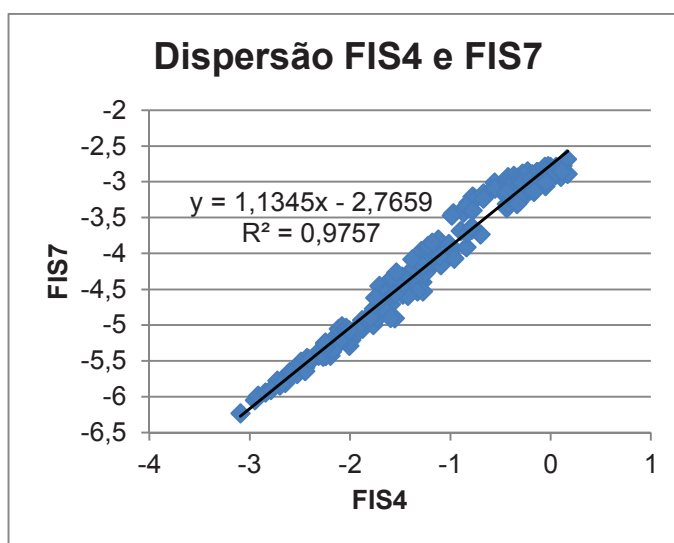
E ainda, foi verificado, através dos testes de hipótese, que todos os coeficientes de correlação obtidos diferem significativamente de zero (95% de confiança), pois os valores-p são muito menores do que 0,05, conforme indicado na última coluna da Tabela 25.





**Figura 72** – Séries históricas de FIS4 e FIS7  
Fonte: Autora (2014)

Na Figura 73 é apresentado o diagrama de dispersão de FIS4 por FIS7. Dado o alto coeficiente de correlação e consequentemente o alto grau de confiança (valor-p muito próximo a zero), o diagrama de dispersão se aproxima de uma reta e a equação de regressão linear pode ser considerada confiável, até porque o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) resultou em 0,9757 (o maior encontrado nesta pesquisa), o que significa que o modelo consegue explicar 97,57% dos valores observados.



**Figura 73** – Diagrama de dispersão de FIS4 por FIS7  
Fonte: Autora (2014)

## 5.2. CORRELAÇÕES ENTRE NÍVEL DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO (NA) E INSTRUMENTOS

A fim de avaliar a influência do nível de água do reservatório (NA), a montante da barragem da UHE GJR, no comportamento da percolação pela fissura do bloco B-11, foram realizados cálculos de verificação de sua correlação com as leituras de alguns instrumentos. Para isso, foram selecionados os seguintes:

- Termômetro TER2, localizado na face de montante da barragem, próximo a crista, que mede a temperatura ambiente no local da fissura;
- Medidor de vazão MVZ6, localizado na galeria inferior de drenagem da barragem, por onde passa toda a água percolada pela fissura.

Foi dispensado o cálculo de correlação entre o NA e o TER1, pois o TER1 e TER2 são muito próximos, medem a mesma grandeza e estão fortemente relacionados. Quanto aos cálculos entre o NA e as leituras dos fissurômetros, não foram realizados pois não há uma teoria fundamentada de que possa haver a influência do nível do reservatório na abertura ou fechamento da fissura, como de fato ocorre com a temperatura. Sendo assim, julga-se que os dois cálculos estabelecidos são suficientes para a análise pretendida.

### 5.2.1 Correlação entre o NA do reservatório e o termômetro TER2

Foram alocadas em uma única matriz as leituras do NA do reservatório e as do termômetro TER2, localizado na face de montante da barragem, para verificação da correlação e da existência de algum tempo de resposta entre eles. Adotando-se as médias semanais das leituras, conforme estabelecido no item 3.3.1, foram obtidos 227 pares de leituras para o cálculo de correlação.

Conforme descrito no item 3.3.2.3, primeiramente foram calculadas as correlações sem a determinação de atrasos ou antecipações entre os dados e na sequência calculadas as correlações considerando a antecipação de 1 semana (-1S) e de 2 semanas (-2S) nas leituras do NA e depois o atraso de 1 semana (+1S) também nas leituras do NA, a fim de verificar o máximo coeficiente de correlação.

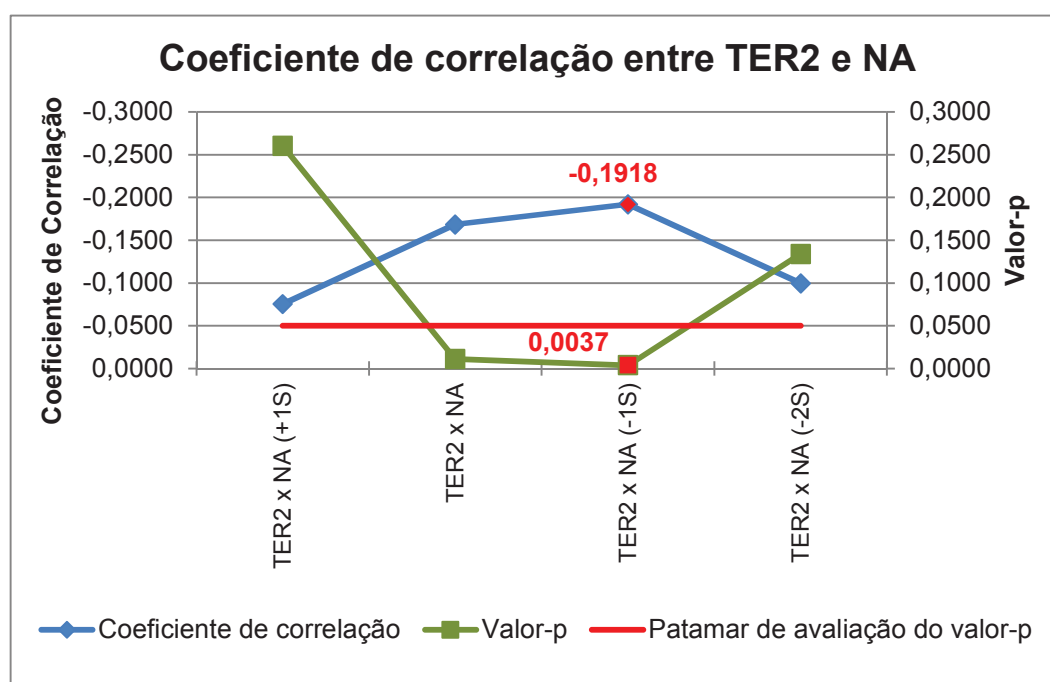
Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 26 e na Figura 74.

**Tabela 26** – Coeficientes de correlação entre NA e TER2

Variável X	Variável Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
TER2	NA (+1S)	-0,0752	0,2602
TER2	NA	-0,1685	0,0110
TER2	NA (-1S)	-0,1918	0,0037
TER2	NA (-2S)	-0,0998	0,1340

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)

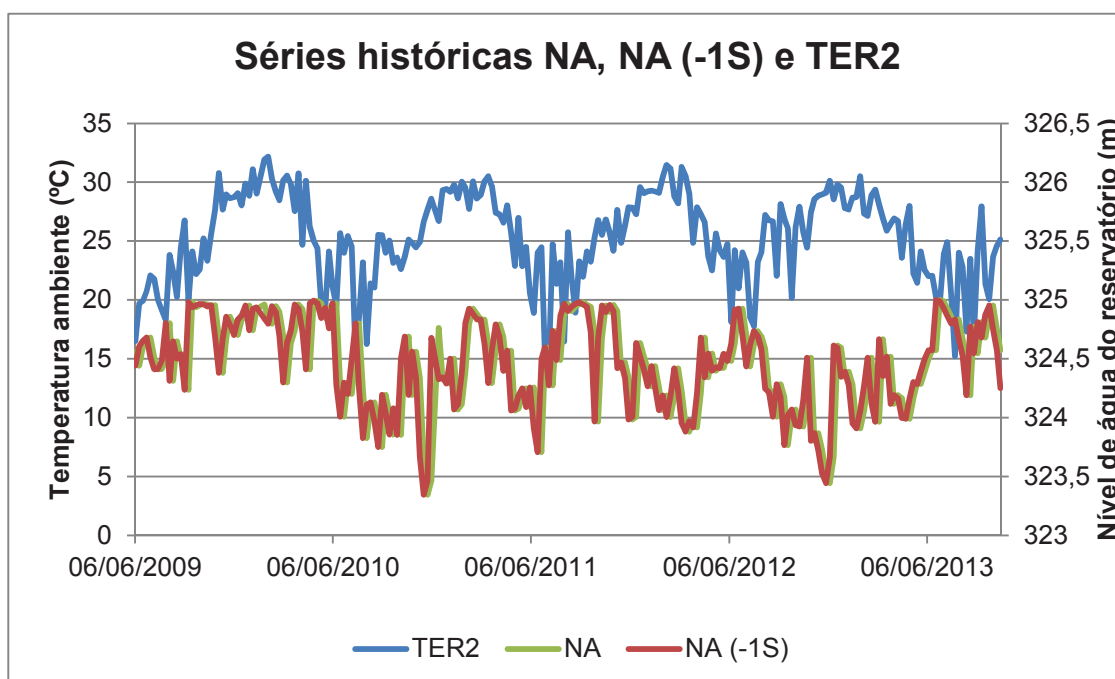
**Figura 74** – Coeficientes de correlação entre NA e TER2

Fonte: Autora (2014)

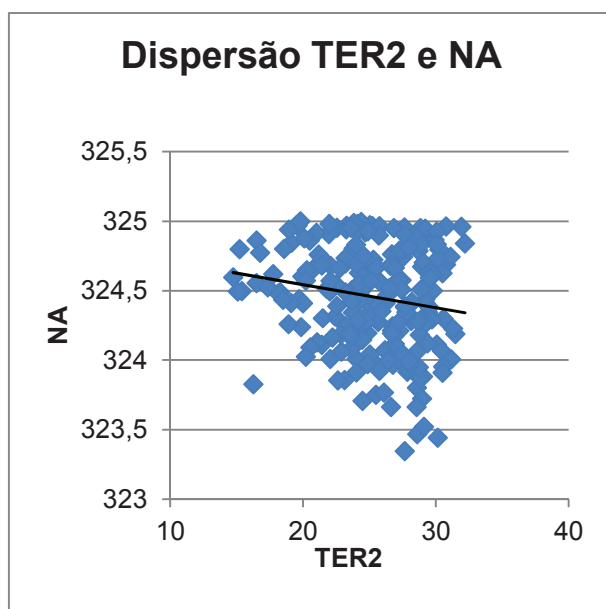
Verificou-se, portanto, que a maior correlação entre as leituras de NA e TER2 ocorre com 1 semana de diferença, sendo este o tempo de resposta do nível do reservatório à temperatura ambiente.

O maior coeficiente de correlação obtido é igual a -0,1918, o que representa muito fraca correlação linear negativa, segundo o critério de Crespo (2009). Muito embora tenha sido verificado, através do teste de hipótese, que o coeficiente de correlação obtido difere significativamente de zero (95% de confiança), pois o valor-p para 1 semana de tempo de resposta é menor do que 0,05.

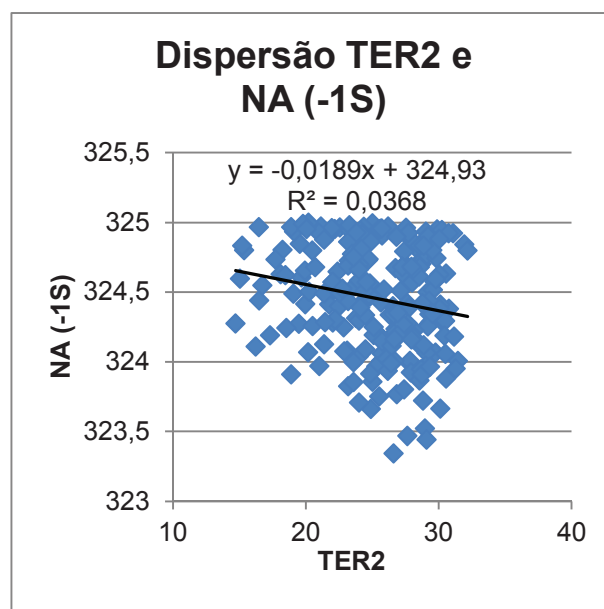
Esta muito fraca correlação entre o NA e o TER2 também pode ser notada na Figura 75, bem como nos diagramas de dispersão apresentados na Figura 76 e na Figura 77.



**Figura 75** – Séries históricas de NA e TER2  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 76** – Diagrama de dispersão de TER2 por NA  
Fonte: Autora (2014)



**Figura 77** – Diagrama de dispersão de TER2 por NA (-1S)  
Fonte: Autora (2014)

### 5.2.2 Correlação entre o NA do reservatório e o medidor de vazão MVZ6

Também foram alocadas em uma única matriz as leituras do NA do reservatório e as do medidor de vazão MVZ6, localizado na galeria inferior de drenagem da barragem, para verificação da correlação e da existência de algum tempo de resposta entre eles. Adotando-se as médias semanais das leituras, conforme estabelecido no item 3.3.1, foram obtidos 231 pares de leituras para o cálculo de correlação.

Conforme descrito no item 3.3.2.3, primeiramente foram calculadas as correlações sem a determinação de atrasos ou antecipações entre os dados e na sequência calculadas as correlações considerando a antecipação de 1 semana e depois de atraso de semanas (uma de cada vez) nas leituras do NA, a fim de verificar o máximo coeficiente de correlação.

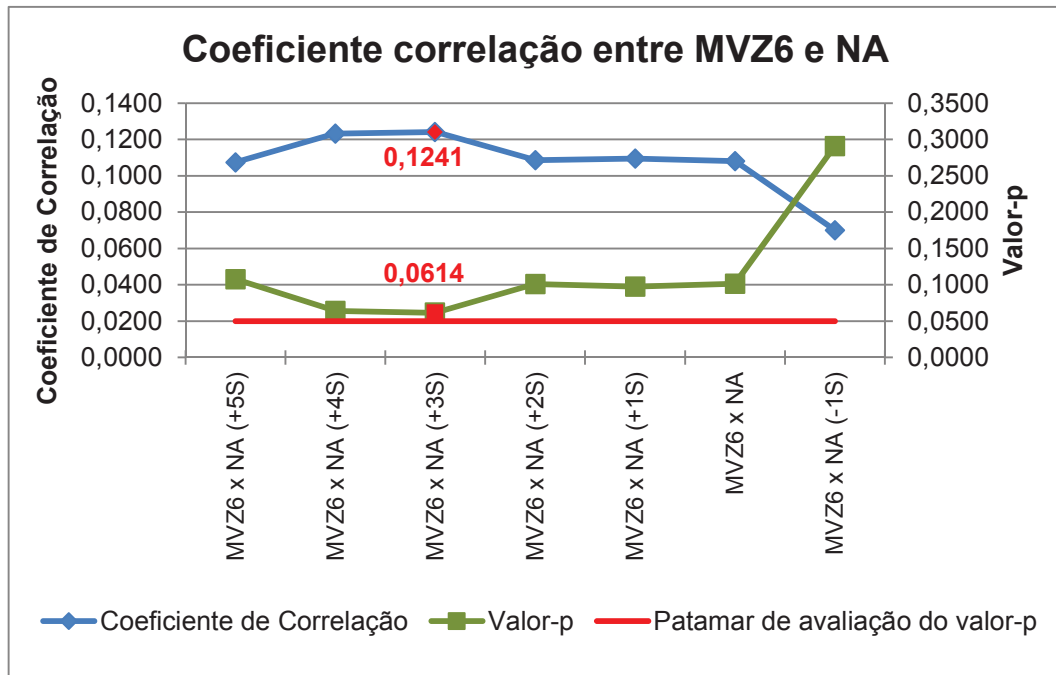
Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 27 e na Figura 78.

**Tabela 27** – Coeficientes de correlação entre NA e MVZ6

Variável X	Variável Y (*)	Coeficiente de correlação	Valor-p
MVZ6	NA (+5S)	0,1073	0,1077
MVZ6	NA (+4S)	0,1232	0,0639
MVZ6	NA (+3S)	0,1241	0,0614
MVZ6	NA (+2S)	0,1086	0,1012
MVZ6	NA (+1S)	0,1096	0,0974
MVZ6	NA	0,1080	0,1014
MVZ6	NA (-1S)	0,0699	0,2908

(\*) Entre os parênteses, o sinal positivo indica atraso de n semanas e o sinal negativo a antecipação de n semanas.

Fonte: Autora (2014)

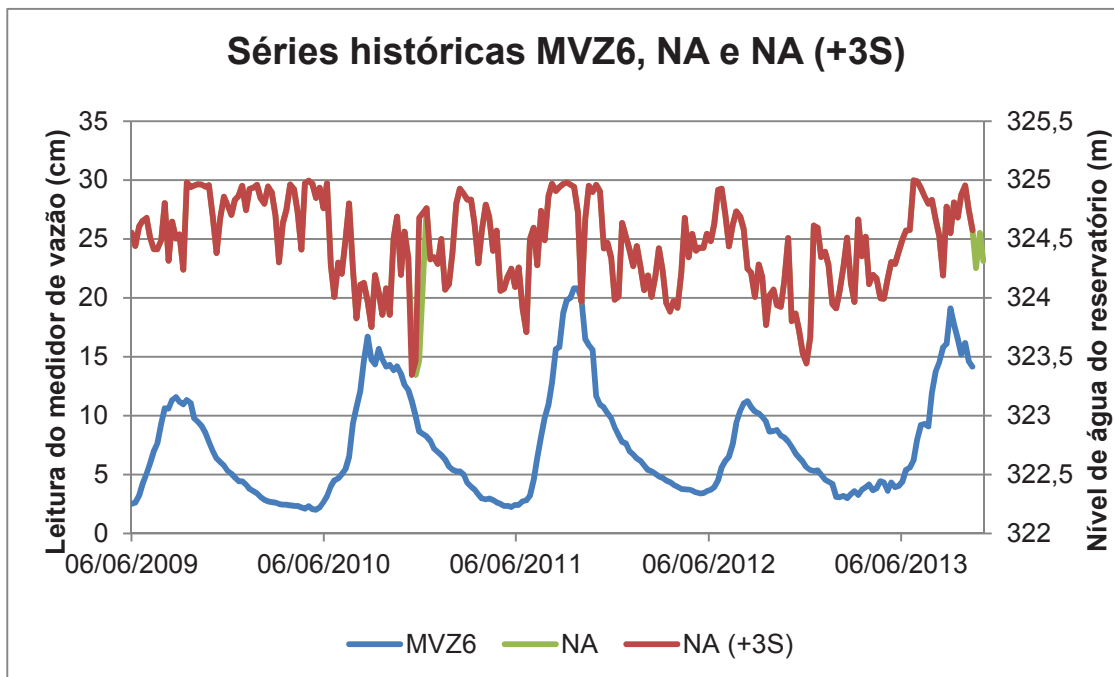


**Figura 78** – Coeficientes de correlação entre NA e MVZ6  
Fonte: Autora (2014)

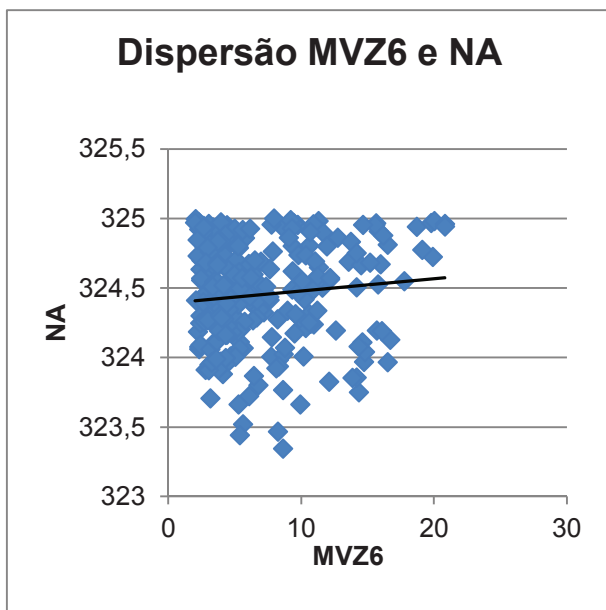
Verificou-se, portanto, que a maior correlação entre as leituras de NA e TER2 ocorre com 3 semana de diferença, sendo este o tempo de resposta do medidor de vazão ao nível do reservatório.

Entretanto o maior coeficiente de correlação obtido é igual a 0,1241, o que representa muito fraca correlação linear positiva, segundo o critério de Crespo (2009). E ainda, o valor-p obtido é maior do que 0,05, o que significa que não pode ser descartada a hipótese nula de que  $\rho$  (coeficiente de correlação) é igual a zero, com 95% de confiança.

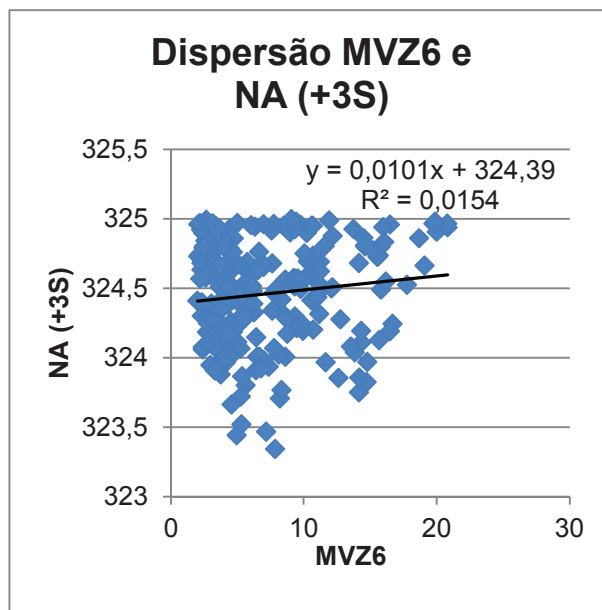
Esta muito fraca, ou até mesmo não significativa, correlação entre o NA e o MVZ6 também pode ser observada na Figura 79, bem como nos diagramas de dispersão apresentados na Figura 80 e na Figura 81.



**Figura 79** – Séries históricas de NA e MVZ6  
 Fonte: Autora (2014)



**Figura 80** – Diagrama de dispersão de MVZ6 por NA  
 Fonte: Autora (2014)



**Figura 81** – Diagrama de dispersão de MVZ6 por NA (+3S)  
 Fonte: Autora (2014)

### 5.3. PROPOSTA DE FERRAMENTA DE CONTROLE E MONITORAMENTO DA FISSURA DO BLOCO B-11

De maneira geral, as correlações entre os instrumentos instalados na fissura do bloco B-11 são fortes ou muito fortes, de acordo com os critérios de avaliação de Crespo (2009) e Martins e Domingues (2011). Conforme apresentado na Tabela 28 todos os coeficientes de correlação ( $|p|$ ) resultaram valores acima de 0,60, considerando-se o melhor tempo de resposta entre as variáveis (indicados na Tabela 29), sendo que os valores negativos indicam correlação negativa (quanto maior uma variável menor a outra) e os valores positivos correlação positivo (quanto maior uma variável maior a outra).

**Tabela 28** – Coeficientes de correlação ( $p$ ) entre os instrumentos da fissura do bloco B-11

	<b>TER1</b>	<b>TER2</b>	<b>MVZ6</b>	<b>FIS3</b>	<b>FIS4</b>	<b>FIS7</b>
<b>TER1</b>	1,0000	0,9501	-0,7667	0,7665	0,8423	0,8219
<b>TER2</b>	0,9501	1,0000	-0,7437	0,6968	0,7882	0,7895
<b>MV6</b>	-0,7667	-0,7437	1,0000	-0,9381	-0,8760	-0,8760
<b>FIS3</b>	0,7665	0,6968	-0,9381	1,0000	0,7924	0,8162
<b>FIS4</b>	0,8423	0,7882	-0,8760	0,7924	1,0000	0,9878
<b>FIS7</b>	0,8219	0,7895	-0,8760	0,8162	0,9878	1,0000

**Tabela 29** – Melhores tempos de resposta entre os instrumentos da fissura do bloco B-11

de ↓ para →	<b>TER1</b>	<b>TER2</b>	<b>MVZ6</b>	<b>FIS3</b>	<b>FIS4</b>	<b>FIS7</b>
<b>TER1</b>	0	0	11	6	9	9
<b>TER2</b>	0	0	11	5	5	5
<b>MV6</b>	-11	-11	0	-1	-3	-3
<b>FIS3</b>	-6	-5	1	0	0	0
<b>FIS4</b>	-9	-5	3	0	0	0
<b>FIS7</b>	-9	-5	3	0	0	0

Baseado nisto, foram obtidos os diagramas de dispersão e as equações de regressão linear que melhor representam as relações entre as variáveis. Estas equações, bem como os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) são indicados na Tabela 30. Ressalta-se que estes  $R^2$  indicam o quanto o modelo explica os valores observados.



**Tabela 30** – Equações de regressão linear e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre os instrumentos da fissura do bloco B-11

$x \downarrow y \rightarrow$	TER1	TER2	MVZ6	FIS3	FIS4	FIS7
TER1	$y = x$ $R^2 = 1$	$y = 0,669x + 9,2916$ $R^2 = 0,9027$	$y = -0,652x + 23,23$ $R^2 = 0,5878$	$y = 0,074x - 3,324$ $R^2 = 0,5876$	$y = 0,139x - 4,467$ $R^2 = 0,7094$	$y = 0,155x - 7,767$ $R^2 = 0,6755$
TER2	$y = 1,3492x - 10,211$ $R^2 = 0,9027$	$y = x$ $R^2 = 1$	$y = -0,904x + 30,52$ $R^2 = 0,5532$	$y = 0,096x - 3,978$ $R^2 = 0,4856$	$y = 0,187x - 5,88$ $R^2 = 0,6212$	$y = 0,216x - 9,533$ $R^2 = 0,6233$
MV6	$y = -0,9011x + 30,826$ $R^2 = 0,5878$	$y = -0,6114x + 29,998$ $R^2 = 0,5532$	$y = x$ $R^2 = 1$	$y = -0,0887x - 0,8521$ $R^2 = 0,5790$	$y = -0,1739x + 0,18$ $R^2 = 0,7673$	$y = -0,1999x - 2,5414$ $R^2 = 0,7673$
FIS3	$y = 7,8513x + 35,877$ $R^2 = 0,5876$	$y = 5,0296x + 32,956$ $R^2 = 0,4856$	$y = -6,527x - 2,345$ $R^2 = 0,5790$	$y = x$ $R^2 = 1$	$y = 1,341x + 0,89$ $R^2 = 0,6279$	$y = 1,6044x - 1,6409$ $R^2 = 0,6661$
FIS4	$y = 5,0893x + 29,655$ $R^2 = 0,7094$	$y = 3,3167x + 29,035$ $R^2 = 0,6212$	$y = -4,412x + 2,583$ $R^2 = 0,7673$	$y = 0,4681x - 0,9865$ $R^2 = 0,6279$	$y = x$ $R^2 = 1$	$y = 1,1345x - 2,7659$ $R^2 = 0,9757$
FIS7	$y = 4,3372x + 41,415$ $R^2 = 0,6755$	$y = 2,8823x + 36,976$ $R^2 = 0,6233$	$y = -3,838x - 7,969$ $R^2 = 0,7673$	$y = 0,4152x + 0,1737$ $R^2 = 0,6661$	$y = 0,86x + 2,3505$ $R^2 = 0,9757$	$y = x$ $R^2 = 1$

Contudo, para a montagem de uma ferramenta de controle e monitoramento da fissura do bloco B-11 partiu-se do princípio de mensurar, a partir dos valores lidos nos termômetros e fissurômetros, os valores mínimos e máximos possíveis de leitura do medidor de vazão, sendo o intervalo entre eles considerado de resultados normais. Para isso foram considerados os dados indicados na Tabela 31.

**Tabela 31** – Dados utilizados na montagem da ferramenta de controle e monitoramento da fissura do bloco-B11, em relação ao MVZ6

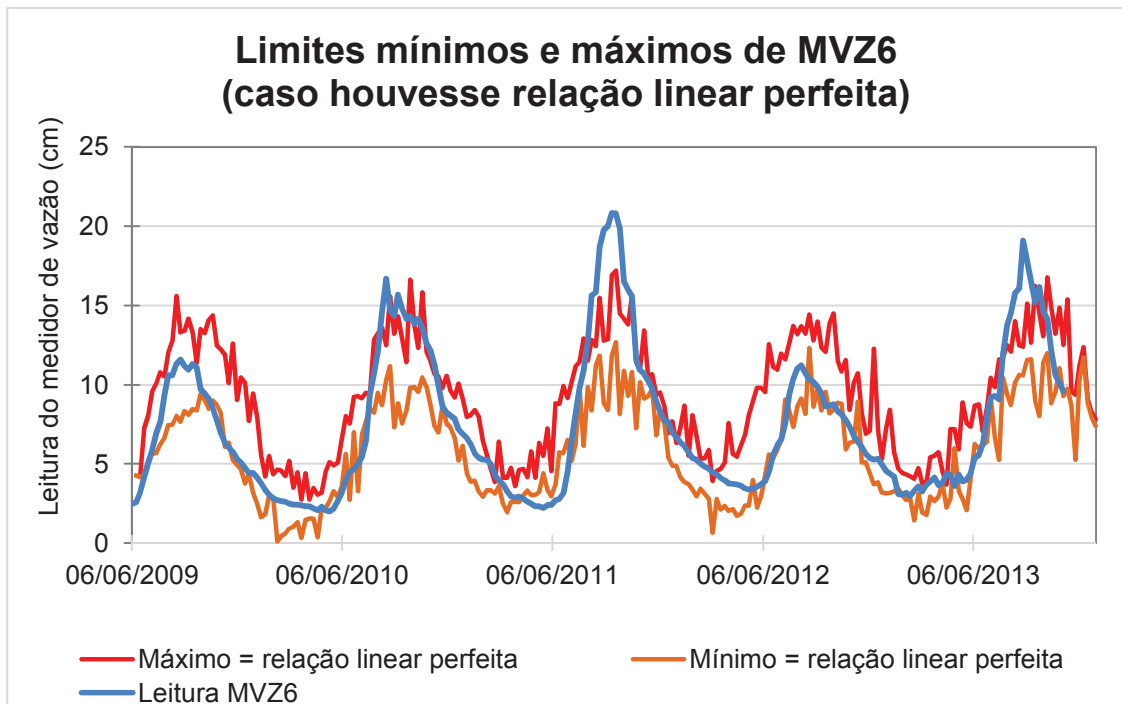
	Tempo de resposta	Equações de regressão linear	Constante para limite máximo	Constante para limite mínimo
TER1	11	$y = -0,652x + 23,23$	+ 11,592	- 6,353
TER2	11	$y = -0,904x + 30,52$	+ 11,725	- 6,994
FIS3	1	$y = -6,527x - 2,345$	+ 8,990	- 8,047
FIS4	3	$y = -4,412x + 2,583$	+ 7,979	- 5,860
FIS7	3	$y = -3,838x - 7,969$	+ 7,715	- 5,619

As constantes para determinação dos limites máximo e mínimo foram obtidas através da amplitude a partir da reta da relação linear, calculada para contemplar 100% dos valores observados no intervalo de tempo considerado na pesquisa, conforme apresentado no item 5.1.

Não foram consideradas as equações das correlações entre instrumentos do mesmo tipo, porque não foram verificados tempos de resposta entre as leituras, nem de TER2 e MVZ6 com o NA, pois as correlações foram fraca e inexistente, respectivamente.

Em uma planilha do MS Excel (apresentada no Anexo 1), foram calculados os valores máximos e mínimos para MVZ6 com as equações de regressão linear mais as constantes indicadas na Tabela 31, a partir de valores reais de leitura de TER1, TER2, FIS3, FIS4 e FIS7. Nestes cálculos foram considerados os respectivos tempos de resposta. Na sequência, para cada linha (que representa uma semana) foram calculados o valor máximo dos máximos obtidos e o mínimo dos mínimos obtidos, definindo-se assim os limites normais para a leitura de MVZ6.

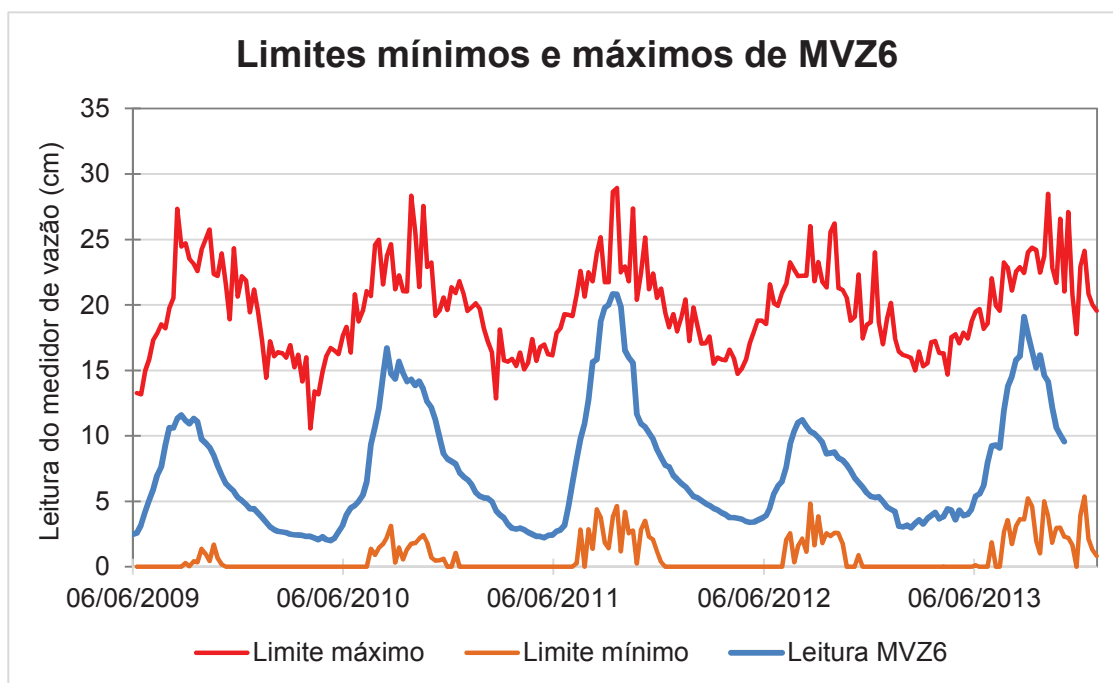
Caso não fossem somadas as constantes às equações de regressão linear, os limites ficariam mais justos e haveria diversas situações que os valores das leituras do MVZ6 os ultrapassariam (vide Figura 82). Como nesta pesquisa nenhuma correlação foi identificada como perfeita e até o momento não houve nenhuma situação de anormalidade na estrutura, considerando-se portanto que todos os valores históricos devem ser considerados como leituras normais, justifica-se a adoção da amplitude.



**Figura 82** – Limites mínimos e máximos de MVZ6 (caso houvesse relação linear perfeita)  
Fonte: Autora (2014)

Sendo assim, na Figura 83 é apresentado o modelo proposto, com os limites estabelecidos com base nas leituras de TER1, TER2, FIS3, FIS4 e FIS7, bem

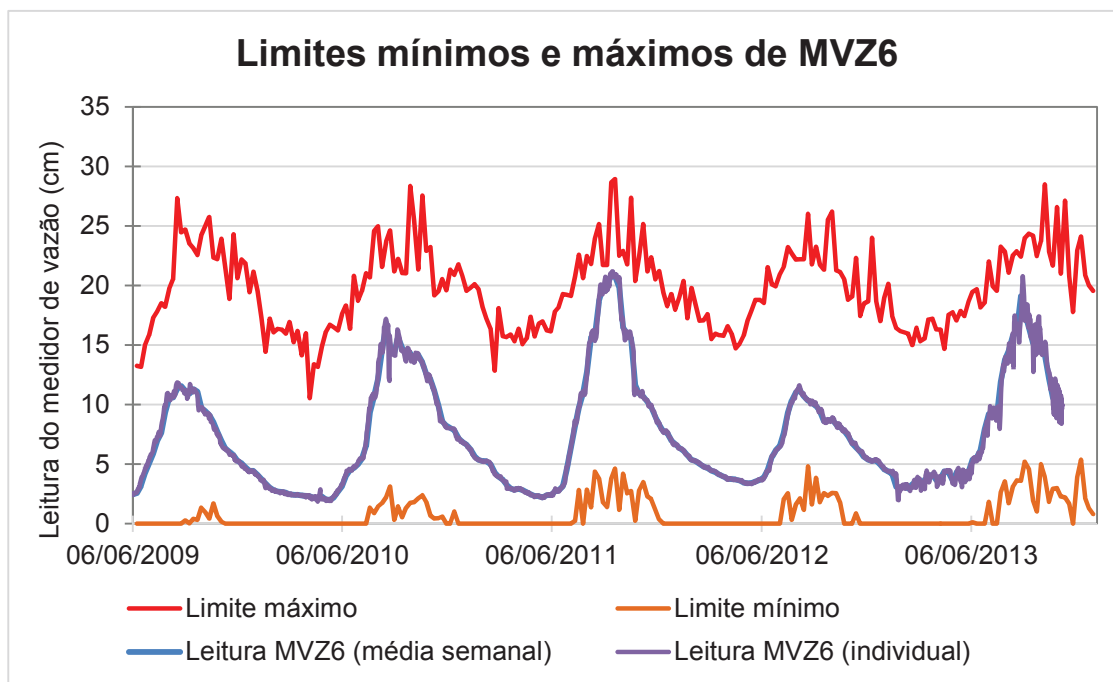
como a média semanal das leituras reais do medidor de vazão (MVZ6), que em todo o período analisado encontra-se contido entre os limites, conforme esperado.



**Figura 83** – Limites mínimos e máximos de MVZ6 do modelo proposto (com indicação das médias semanais das leituras de MVZ6)

Fonte: Autora (2014)

Este mesmo modelo pode ser aplicado para avaliação dos dados obtidos do MVZ6 individualmente. A fim de comprovar que os limites definidos atendem também o histórico de leituras individuais, na Figura 84 foram plotados estes valores, permitindo, inclusive, uma comparação com as médias semanais, o que demonstra que graficamente são coincidentes.

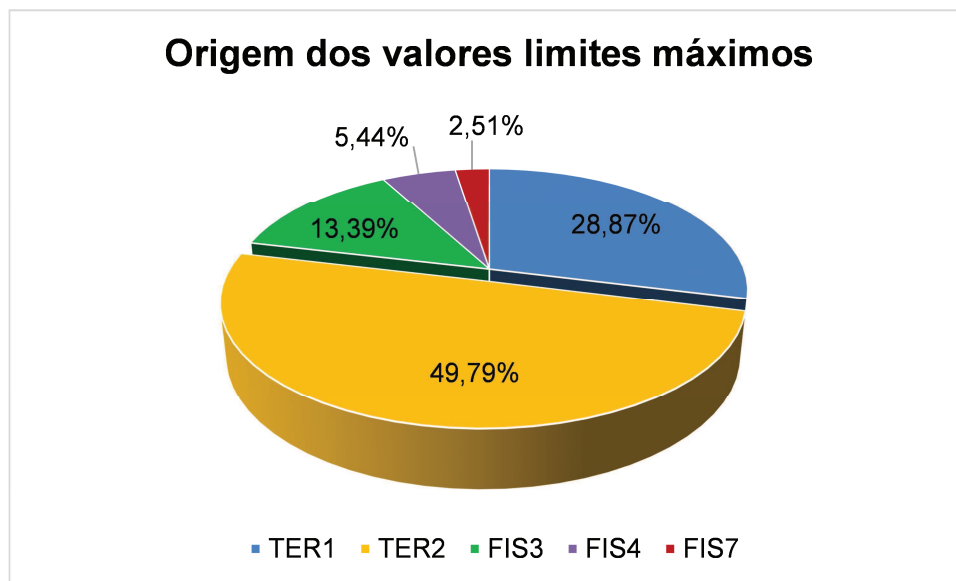


**Figura 84** – Limites mínimos e máximos de MVZ6 do modelo proposto (com indicação das médias semanais das leituras de MVZ6, bem como as leituras individuais)  
 Fonte: Autora (2014)

No período considerado nesta pesquisa:

- A menor diferença entre o limite máximo e a média semanal da leitura de MVZ6 foi igual a 1,73 cm, em setembro de 2011;
- A menor diferença entre o limite máximo e a leitura individual de MVZ6 foi igual a 1,34 cm, também em setembro de 2011;
- A maior média semanal da leitura do MVZ6 foi igual a 20,81 cm, em setembro de 2011 (sendo a maior leitura individual igual a 21,20 cm, neste mesmo mês); e
- A menor média semanal da leitura do MVZ6 foi igual a 2,01 cm, em maio de 2010 (sendo a menor leitura individual igual a 1,87 cm, em abril de 2010).

Com relação ao limite máximo, que é o principal fator de controle da estrutura, afinal quanto maior a leitura, maior a vazão de percolação pela barragem, no intervalo de tempo observado, foi definido pelas equações de relação entre o MVZ6 e TER2 (49,79%); TER1 (28,87%), FIS3 (13,39%), FIS4 (5,44%) e FIS7 (2,51%), conforme apresentado na Figura 85.

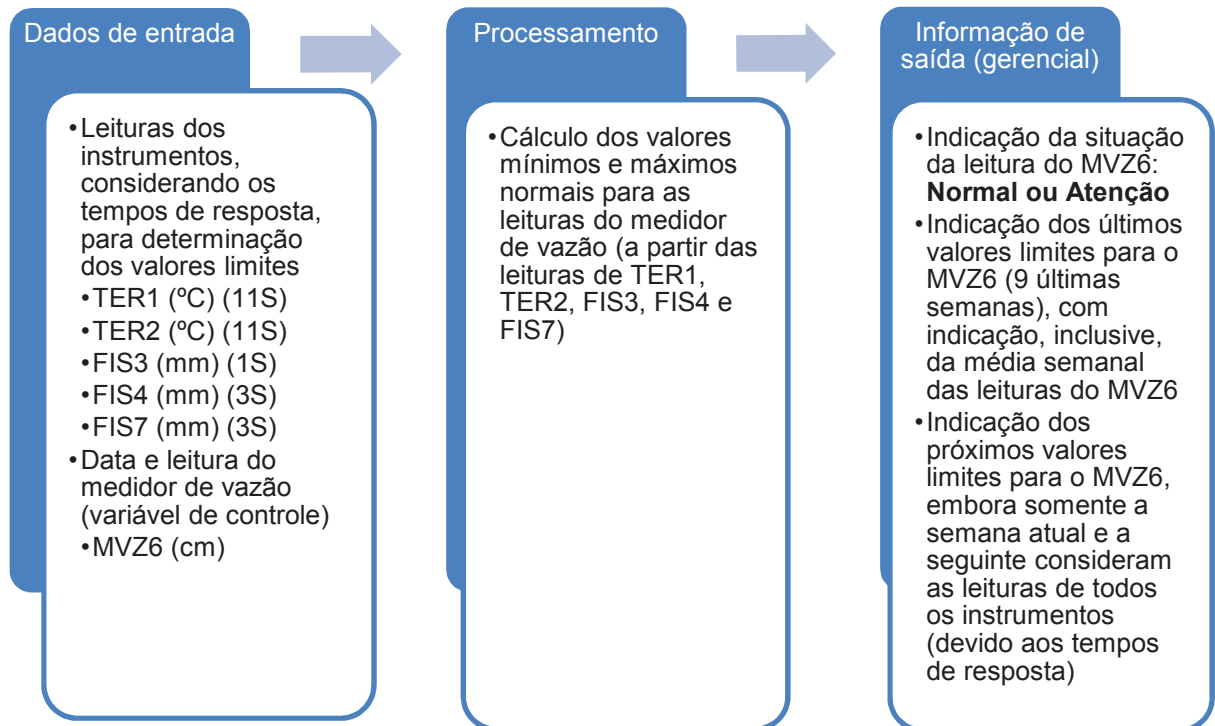


**Figura 85** – Origem dos valores limites máximos  
Fonte: Autora (2014)

Sendo assim, as informações foram organizadas em uma planilha do MS Excel para montagem do relatório de monitoramento da vazão pela fissura do bloco B-11, cujo exemplo é apresentado na Figura 87.

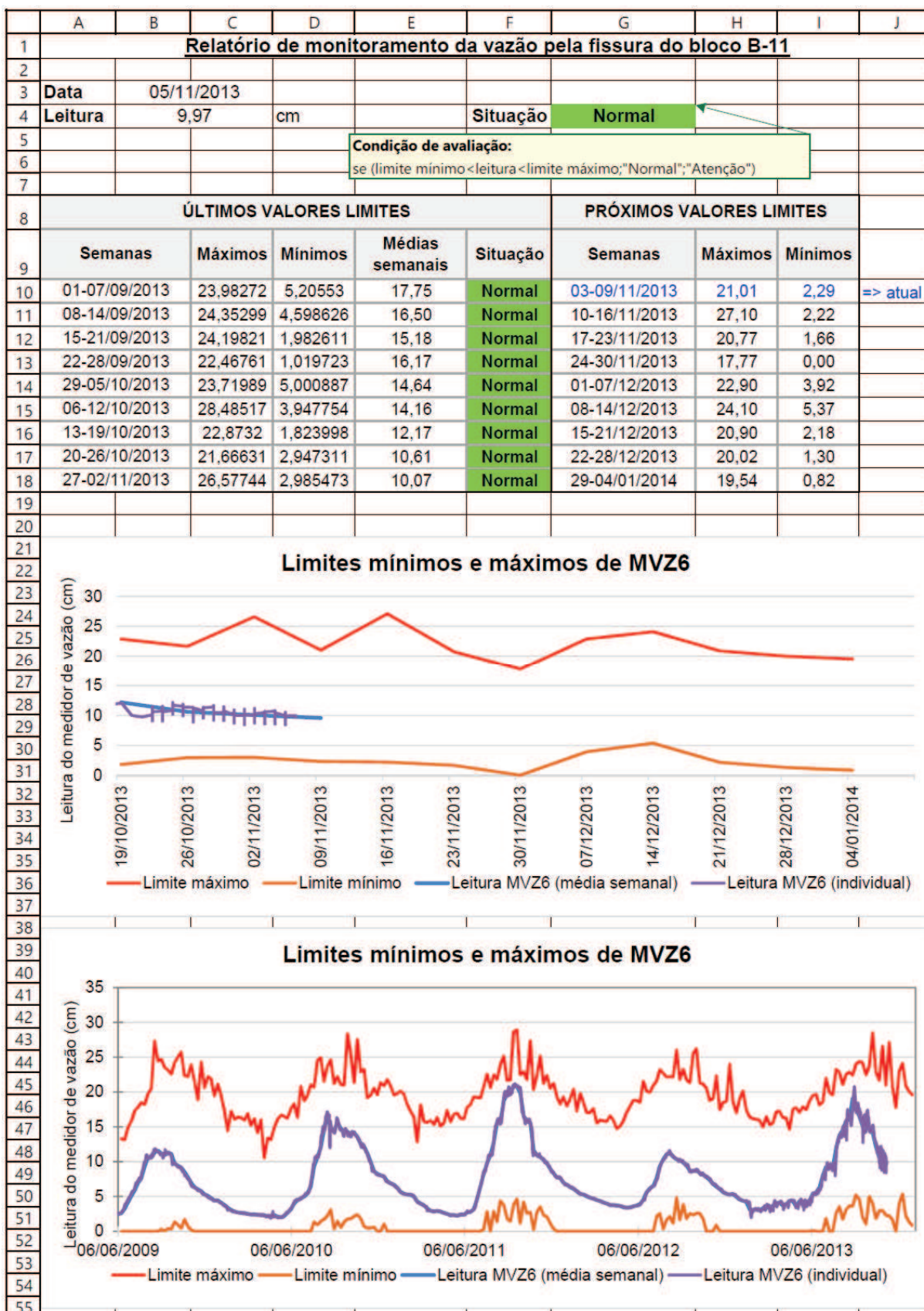
Conforme indicado na Figura 87, foram definidos dois níveis de operação para os valores do medidor de vazão MVZ6, sendo eles 'Normal' e 'Atenção'. É chamada de situação normal quando os valores de leitura do medidor de vazão MVZ6 encontram-se entre os limites mínimos e máximos estabelecidos no modelo. Enquanto que a situação de atenção é caracterizada quando os valores de leitura estão abaixo do limite mínimo ou acima do limite máximo.

Os dados de entrada e as informações saídas deste relatório gerencial indicadas na Figura 86. Uma vez resultada a situação 'Atenção', caracterizando comportamento anormal da fissura, deverá ser recorrido à inspeção visual a fim de avaliar se é necessária alguma ação.



**Figura 86** – Dados de entrada e informações de saída da ferramenta gerencial  
 Fonte: Autora (2014)

Conforme citado por Balbi (2008), para os parâmetros medidos pela instrumentação de barragens, usualmente adotam-se três níveis de operação: normal, atenção e emergência. O nível “emergência” deve ser atribuído para a condição de risco estrutural da estrutura. Como no caso da UHE GJR a fissura do bloco B-11 tem as mesmas características de uma junta entre blocos e já foi confirmada, por INTERTECHNE *et al.* (1999), a estabilidade da barragem mesmo com sua presença (vide item 4.3), não é possível neste momento mensurar um nível de emergência para o modelo. Todavia, qualquer indício de valores de atenção, a estrutura deve ser inspecionada e analisada com urgência, verificando-se qualquer anomalia que possa comprometer a confiabilidade da barragem.



**Figura 87** – Exemplo de relatório de monitoramento elaborado no MS Excel  
 Fonte: Autora (2014)

#### 5.4. PROPOSTA DE PROCESSO DE MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO DAS FISSURAS TÉRMICAS EM BARRAGENS DE CONCRETO GRAVIDADE

Baseado nos resultados do estudo de caso desta pesquisa é proposto um fluxograma de processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade (Figura 88), a partir do fluxograma típico de monitoramento proposto por MAC (2005) apresentado na Figura 2.

No fluxograma proposto o processo de monitoramento inicia-se na identificação da fissura e na instalação de instrumentos de auscultação (fissurômetros, medidores de vazão e termômetros de superfície), se ainda não existentes. Esta instrumentação produzirá leituras (manuais ou automatizadas) que deverão ser organizadas, a fim de realizar a análise estatística, com a determinação das correlações e, principalmente, dos tempos de resposta, definição das equações de regressão linear e determinação dos valores limites (mínimos e máximos) que representam o comportamento normal da estrutura. Estes resultados da análise estatística subsidiarão a montagem de ferramenta de monitoramento, similar a apresentada no item 5.3.

A cada nova leitura produzida pelos instrumentos da fissura, deverá ser realizada a avaliação deste valor com o auxílio da ferramenta de monitoramento, verificando se ele encontra-se entre os valores mínimos e máximos estabelecidos. Caso esteja, considera-se a leitura como normal, arquivando-a para futura utilização em revisão periódica. Já se o valor obtido estiver fora dos limites, deverá ser avaliada a necessidade de alguma ação, através da investigação (inspeção visual) no local. Em caso de não se encontrar qualquer anomalia, simplesmente arquiva-se o valor da leitura, considerando-o como normal. Caso contrário, deverá ser analisada se a ação a ser tomada é emergencial, o que demandará imediato início de resposta. Não se caracterizando ação emergencial, a questão será operacional, com o registro das evidências e consequentes medidas para planejamento e execução dos tratamentos recomendados.

Com relação à revisão periódica do processo, trata-se da atualização dos valores limites com base nos últimos dados de leitura. Esta revisão dependerá dos valores de leitura encontrados. Se, no período, nenhuma vez for obtido valor fora dos limites pré-estabelecidos, esta frequência de revisão poderá ser menor, no mínimo anual. Enquanto que se obtidos valores fora dos limites pré-estabelecidos, porém em



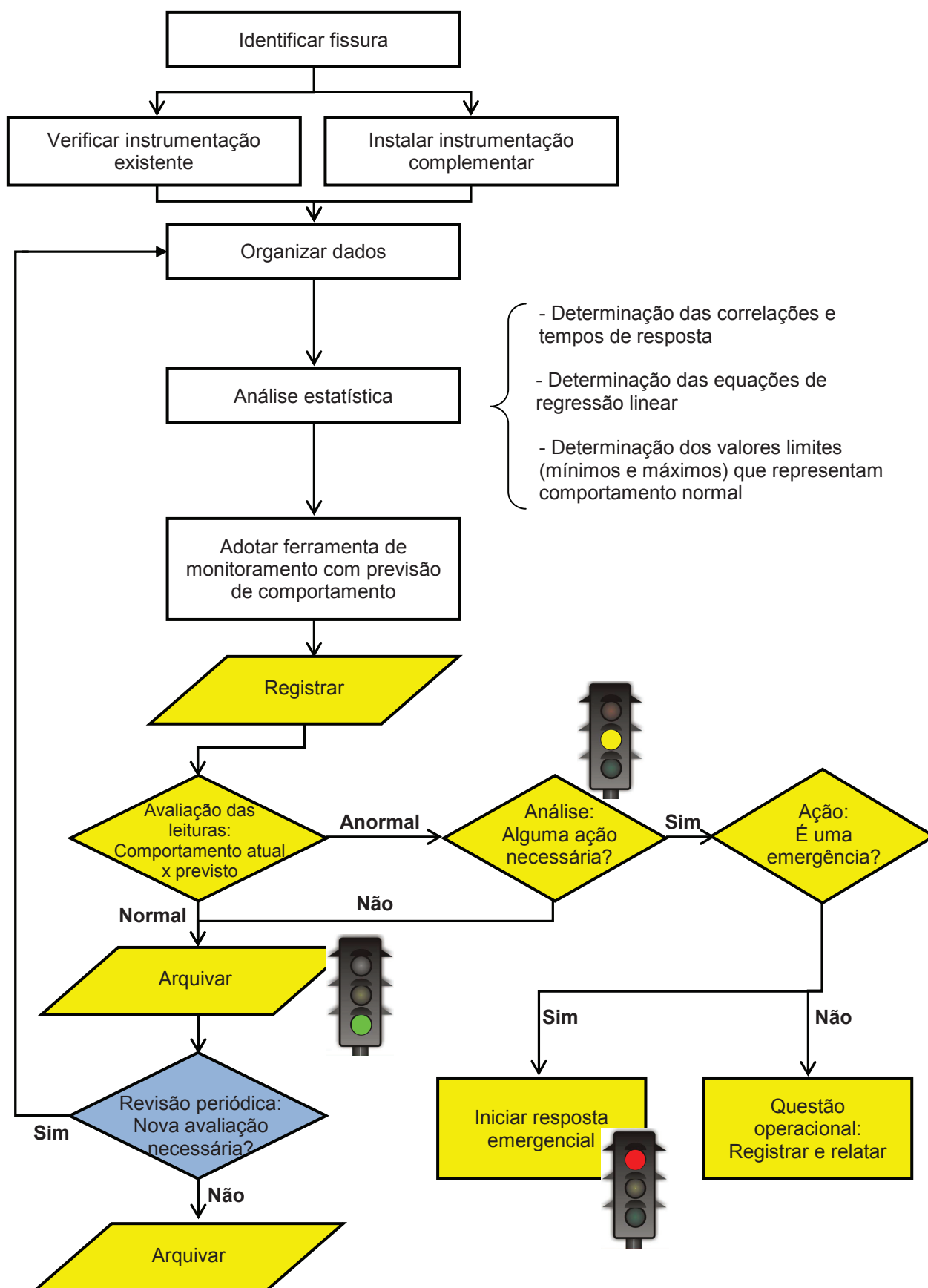
inspeção visual não identificada nenhuma anormalidade, a revisão dos limites poderá ser imediata.

O importante é que os valores de leitura possam ser rapidamente analisados, para que se houver qualquer anomalia no comportamento da fissura e da estrutura, ela seja precocemente detectada e rigorosamente avaliada, para introdução de medidas de ação adequadas.

Destaca-se que em relação ao fluxograma típico de monitoramento proposto por MAC (2005) manteve-se a mesma sequência de etapas a partir da fase de avaliação dos dados, que estão apresentadas na Figura 88 em amarelo. A única exceção refere-se a revisão periódica, apresentada em azul na Figura 88. Ao contrário do estabelecido por MAC (2005), neste fluxograma proposto considera a necessidade de revisão mesmo quando os valores obtidos estão dentro dos limites definidos de comportamento normal da estrutura, pois estes também impactam nos resultados dos cálculos estatísticos.

Na Figura 88 também são apresentadas figuras de semáforos com luz verde, amarelo e vermelho para indicar didaticamente as etapas que representam situação normal, de atenção e de alerta, respectivamente.

No Apêndice 3 é apresentado este fluxograma proposto na pesquisa sem as ilustrações, ou seja, as indicações de cores e figuras de semáforos.



**Figura 88** – Fluxograma de processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade  
Fonte: Autora (2014)

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **6.1. CONCLUSÕES**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta pesquisa, destacando: as conclusões em relação aos objetivos e os resultados obtidos com o desenvolvimento do estudo de caso e à elaboração da proposta de processo de monitoramento do comportamento de fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade.

#### **6.1.1 Conclusões quanto aos objetivos da pesquisa**

A presente dissertação teve como tema o processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade, justificado pela importância do desenvolvimento de métodos que possibilitem maior confiabilidade das barragens e a consequente redução de acidentes com danos ambientais, sociais e econômicos.

O atual cenário do setor caracteriza-se pela necessidade das concessionárias atenderem a Lei nº 12.334/2010 de 20 de setembro de 2010, a qual estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), cabendo-lhes, como responsáveis legais, o desenvolvimento de ações para garantir a segurança das estruturas. Neste contexto, destaca-se a importância em investir no estabelecimento de processos de monitoramento, que possibilitem a utilização de informações disponíveis para gerar ferramentas de controle que permitam análises técnicas mais rápidas e confiáveis.

Logo, esta pesquisa buscou responder a seguinte questão: É possível desenvolver um processo de monitoramento de manifestações patológicas em barragens de concreto gravidade, com base na análise dos dados de instrumentação e no estabelecimento de valores de controle?

Visando responder esta pergunta, a pesquisa apresentou uma proposta de processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade, com base na análise dos dados de instrumentação e no estabelecimento de valores de controle, atendendo ao principal objetivo da pesquisa. Embora a fissuração de barragens por efeitos térmicos seja apenas uma dentre várias manifestações patológicas ocorrentes nestas estruturas, justifica-se sua escolha nesta

pesquisa, pois seu controle é predominante nas preocupações de obras de concreto massa aplicada aos aproveitamentos hidráulicos, devido às variações térmicas e ao grau de restrição impostos no processo construtivo.

Na busca deste objetivo geral foram utilizadas análises estatísticas para avaliação da influência da temperatura ambiente e do nível de água do reservatório sobre as leituras dos instrumentos de monitoramento de uma fissura, bem como a relação entre eles. Para isso foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson e determinados os tempos de resposta entre pares de variáveis. Baseado nos resultados encontrados foi possível a definição dos valores de controle, que representam a condição de normalidade da estrutura, através dos diagramas de dispersão. Todos os cálculos foram desenvolvidos no software MS Excel, sendo dispensável a utilização de softwares específicos de estatística.

Através do desenvolvimento do estudo de caso foi possível evidenciar que a preparação dos dados de instrumentação requer delicada análise e definição de critérios, pois usualmente instrumentos distintos possuem diferentes frequências ou programações de leitura. Também é necessário identificar possíveis falhas nos dados gerados, seja do leitorista que realiza as medições manualmente ou do sistema de automação que pode estar descalibrado.

Como o resultado da análise estatística do estudo de caso foi satisfatório, pois foram determinados os valores de controle a partir dos dados de instrumentação, inclusive com a elaboração de ferramenta de monitoramento, o método adotado foi aprovado para constituir parte do processo de monitoramento proposto nesta pesquisa, o qual foi apresentado em formato de fluxograma.

Portanto, considera-se que a questão de pesquisa foi respondida, assim como os objetivos atingidos.

#### 6.1.2 Conclusões quanto ao estudo de caso

A fim de atender o objetivo geral desta pesquisa, de propor um processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade, com base na análise dos dados de instrumentação e no estabelecimento de valores de controle, foi adotado o estudo de caso da barragem da UHE GJR, a qual apresenta uma fissura térmica localizada no bloco B-11. Esta fissura foi identificada na estrutura antes mesmo do enchimento do reservatório da usina e é derivada do método construtivo adotado combinado ao ritmo de produção imposto.

Nesta fissura, em maio/2004, foram instalados instrumentos a fim de propiciar um melhor monitoramento do seu comportamento.

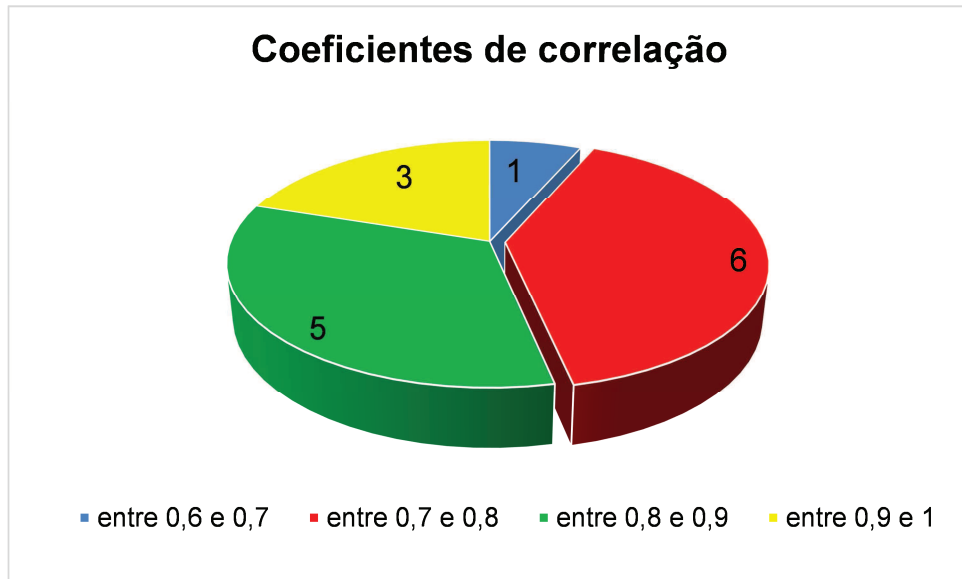
Embora trate-se de um estudo de caso único, que considera o monitoramento de uma única fissura, foram avaliados os dados de 3 fissurômetros e 2 termômetros de superfície, aumentando-se, assim, a validade do constructo da pesquisa.

Sobre os instrumentos instalados na fissura do bloco B-11, LACTEC (2005) já havia apresentado uma análise das leituras compreendidas em um período de tempo menor a um ano (maio/2004 a janeiro/2005), admitindo inclusive que os valores de controle deveriam ser definidos posteriormente, quando se dispusesse de um conjunto de dados mais significativo. Nesta primeira análise apenas o fissurômetro FIS7, que está localizado na crista da barragem, apresentava leituras que indicavam relação com a temperatura ambiente, embora na época não tenha sido verificada estatisticamente a correlação entre os dados. Já os fissurômetros instalados nas galerias de drenagem (FIS3 e FIS4) até então não tinham apresentado variações de deslocamento significativas.

Com esta pesquisa, que considerou as leituras de instrumentação dos últimos 4,5 anos (junho/2009 a novembro/2013), quando todos os instrumentos já apresentavam-se calibrados e produziram dados confiáveis, foi possível desenvolver os cálculos de correlação e estabelecer os valores de alerta para o monitoramento do comportamento da estrutura, mesmo sem considerar todas as variáveis interferentes no sistema.

Os cálculos de correlação foram realizados sempre entre duas variáveis, ou seja, entre pares de instrumentos, sendo consideradas as médias semanais das leituras, pois além dos instrumentos não terem a mesma frequência de leitura, a dilatação do concreto depende da quantidade de calor absorvida durante vários dias consecutivos, devido à lenta propagação de calor no corpo da estrutura, conforme mencionado por Buzzi (2007).

Ao todo foram calculados 15 (quinze) coeficientes de correlação de Pearson entre pares de instrumentos, sendo que 1 (um) resultou abaixo de 0,7; 3 (três) entre 0,7 e 0,8; 5 (cinco) entre 0,8 e 0,9; e 6 (seis) maiores que 0,9 (vide Figura 89). Ou seja, de acordo com o critério de classificação de Crespo (2009), todos apresentaram correlação forte ou muito forte.



**Figura 89** – Coeficientes de correlação  
Fonte: Autora (2014)

Contudo, nesta pesquisa foi verificada:

- Correlação forte positiva entre a temperatura ambiente e o comportamento das fissuras térmicas (abertura e fechamento) da barragem de concreto gravidade;
- Correlação forte negativa entre a temperatura ambiente e as vazões de percolação na galeria de drenagem da barragem de concreto gravidade;
- Correlação forte negativa ou muito forte negativa entre o comportamento das fissuras térmicas e as vazões de percolação na galeria de drenagem da barragem de concreto gravidade;
- Correlação muito forte positiva entre as leituras dos dois termômetros; e
- Correlação forte ou muito forte positiva entre as leituras dos três fissurômetros.

Destaca-se que todas as correlações entre as leituras do medidor de vazão e dos outros instrumentos (termômetros e fissurômetros) são negativas. Isto significa que quando a temperatura for máxima, a vazão de percolação será mínima e vice versa, assim como quando a leitura no fissurômetro for máxima (portanto indicando fechamento), a vazão de percolação será mínima e vice versa. Este resultado vai de encontro ao esperado, visto que temperaturas ambientes elevadas provocam a

dilatação do concreto da barragem, produzindo o fechamento das juntas entre blocos e, conseqüentemente, da fissura.

Os coeficientes de correlação obtidos entre os fissurômetros e o termômetro TER1 foram maiores que os obtidos entre os fissurômetros e o termômetro TER2. Este resultado pode ser atribuído ao fato do termômetro TER2 estar localizado na face de montante da barragem, onde pode haver influência do reservatório nas suas leituras.

Dentre os coeficientes de correlação do medidor de vazão MVZ6 e os fissurômetros, o maior foi encontrado com o fissurômetro FIS3, o qual está localizado na mesma galeria de drenagem do MVZ6. Este resultado vai de encontro ao esperado, pois como este medidor de vazão recebe contribuição praticamente só da fissura do bloco B-11, suas leituras estão diretamente relacionadas ao comportamento da fissura, principalmente nas regiões mais próximas, que a água possui caminho mais direto.

Com relação aos coeficientes de correlação entre os termômetros e os fissurômetros, os menores valores encontrados foram com o fissurômetro FIS3. Este resultado pode ser atribuído à localização deste instrumento na galeria inferior da barragem, onde existe a maior restrição de deslocamento (tanto da fundação quanto da maior massa de concreto) e também maior influência da temperatura interna do maciço.

Com o cálculo dos coeficientes de correlação foram verificados estatisticamente os tempos de resposta entre as leituras e determinadas as equações de regressão linear, para a determinação dos valores de alerta (limites mínimos e máximos aceitáveis).

Na proposta de ferramenta de monitoramento do comportamento da fissura foi adotado o controle através das leituras do medidor de vazão, baseado nas leituras reais obtidas os dois termômetros e dos três fissurômetros, considerando os respectivos tempos de resposta. Não foi considerado o nível de água do reservatório, pois sua correlação com as leituras do MVZ6 não é significativa.

De maneira geral, conclui-se que os procedimentos de coleta, tratamento e análise dos dados adotados nesta pesquisa são satisfatórios, pois resultaram uma ferramenta de controle que é aplicável na prática, tanto para o caso do estudo, como para outras fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade, desde que instalado um sistema de instrumentação de auscultação.

### 6.1.3 Conclusões quanto à proposta de processo de monitoramento de fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade

A proposta de processo de monitoramento de fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade foi elaborada com base no referencial teórico, em especial o fluxograma típico estabelecido por MAC (2005), e nos procedimentos de cálculo de correlações e estabelecimento de valores de controle utilizados no estudo de caso, que desempenharam resultados satisfatórios.

O processo proposto foi apresentado em forma de fluxograma, que tem fases bem identificadas: identificação da fissura; verificação e instalação de instrumentação; coleta de dados; tratamento dos dados (método estatístico); avaliação do comportamento comparando-se as leituras com os valores limites definidos pela série histórica; e tomada de decisão (arquivamento/revisão/ação emergencial).

Destaca-se que a pesquisa em questão detalhou o processo proposto principalmente na fase de tratamento dos dados, através do emprego de método estatístico simples de correlação de pares de variáveis, pois é aplicável independente de particularidades. Por outro lado, a fase de tomada de decisão deve ser avaliada em cada caso específico, por depende de muitos aspectos, que são verificados em inspeções visuais no local ou baseadas em características particulares de projeto.

Devido à proposta ter sido elaborada com base nas orientações de MAC (2005), nota-se grande similaridade entre os fluxogramas. Isto deve-se ao fato do conceito de monitoramento da estrutura, como um todo, ser aplicável para o monitoramento de uma manifestação patológica isoladamente.

## 6.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A presente pesquisa confirmou que é possível desenvolver ferramentas gerenciais de controle de manifestações patológicas, baseado na análise de dados de instrumentação de auscultação e definição de valores de controle, utilizando métodos estatísticos.

Com o mesmo enfoque desta pesquisa, ou seja, comportamento de fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade, adotando-se o mesmo método de pesquisa, sugere-se considerar as seguintes possibilidades:



- Considerar na organização dos dados as médias mensais das leituras dos instrumentos, a fim de verificar se as correlações serão mais fortes;
- Verificar a influência da temperatura interna do concreto no comportamento da fissura (abertura e fechamento) e nas leituras de vazão de percolação;
- Aplicar em outro estudo de caso, para consolidação do método.

Sugere-se, ainda, que sejam desenvolvidos estudos de processos de monitoramento para outros tipos de manifestações patológicas também recorrentes em estruturas de concreto gravidade, por exemplo as reações químicas levando à formação de produtos expansivos, como no ataque por sulfato e reação álcali-agregado.

## 7. REFERÊNCIAS

ACI Committee 207. **Effect of Restraint, volume change, and reinforcement on cracking of mass concrete** (ACI 207.2R-95). Reapproved, 2002.

ALVES, J. M.; ALLAMAN, I. B. **Estatística aplicada a pesquisa-ação** (apostila). Ilhéus, 2013. Disponível em: <<http://nbcgib.uesc.br/lec/download/ivan/Apostila.pdf>>. Acesso em: 13/02/2014 às 16h30min.

ARAÚJO, J. M.; AWRUCH, A. M. **Cracking safety evaluation on gravity concrete dams during the construction phase**. Computer & Structures, v. 66, n. 1, p. 93-104, Grã-Bretanha, 1998.

BALBI, D. A. F. **Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens. Estudo de caso: barragem de Peti – MG** (Dissertação). Belo Horizonte, 2008

BALBI, D. A. F.; BARBOSA; L. R. A.; SILVA, E. do S.; **Plano de ações emergenciais para barragens das PCH da CEMIG GT**. In: VIII Simpósio sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Porto Alegre – RS – 01 a 04 de Maio de 2012. T31-A02.

BARBOSA, N. P.; MENDONÇA, A. V.; SANTOS, C. A. G.; LIRA, B. B. **Barragem de Camará**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba - Centro de Tecnologia. 2004. (Relatório). Disponível em: <[http://www.prpb.mpf.gov.br/news/docs/Camara/relatorio\\_final\\_ufpb.pdf](http://www.prpb.mpf.gov.br/news/docs/Camara/relatorio_final_ufpb.pdf)>. Acesso em: 18/07/2012.

BERMEJO, J. P. C. **Inundaciones de octubre de 1982: la pantanada de Tous – Reportaje fotográfico, Parte I**. In: Revista del aficionado a la meteorología. n. 44. Out. 2006. Disponível em: <<http://www.tiempo.com/ram/2723/inundaciones-de-octubre-de-1982-la-pantanada-de-tous/>>. Acesso em: 25 fev. 2014.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional - MI, PROÁGUA Semi-Árido Obras (UGPO). **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília, 2002. 148p.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Diário Oficial [da] da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 1, 21 set. 2010. Disponível em: <<http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/b110756561cd26fd03256ff500612662/a17b4f5371bb7904832577a5003c270d?OpenDocument>>. Acesso em: 23/07/2013.

BRASIL, L. S. S. **Utilização de modelagens uni e bidimensional para a propagação de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem. Estudo de Caso: Barragem de Rio de Pedras** (dissertação). Belo Horizonte, 2005.

BRUEL, F. **La catastrophe de Malpasseten 1959**. Disponível em: <[http://www.ecolo.org/documents/documents\\_in\\_french/malpasset/malpasset.htm](http://www.ecolo.org/documents/documents_in_french/malpasset/malpasset.htm)> Acesso em: 18/05/2012.

Bureau of Reclamation – United States Department of the Interior. **Design of Gravity Dams – Design Manual for Concrete Gravity Dams**. Denver, Colorado, 1976.

BUZZI, M. F. **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 de Mestrado). Curitiba, 2007.

CARVALHO, C.; PARAJARA, F. **Barragem de Algodões se rompe e água atinge 20 metros de altura em cidade do Piauí**. O Globo, São Paulo, 28 de maio de 2009. Disponível em < <http://oglobo.globo.com/pais/barragem-de-algodoes-se-rompe-agua-atinge-20-metros-de-altura-em-cidade-do-piaui-3123058>>. Acesso em 25/02/2014.

CARVALHO, J. V.; ROMANEL, C. **Redes neurais temporais aplicadas ao monitoramento de barragens**. Revista eletrônica de Sistemas de Informação, v. 6, n 1, jan.-jun.2007.

CBGB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. CIGB. ICOLD. **Auscultação e instrumentação de barragens no Brasil**. In: II Simpósio sobre Instrumentação de Barragens. Volume I. Agosto, 1996.

CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens, Comissão Regional de Segurança de Barragens. **Guia Básico de Segurança de Barragens**. São Paulo: 1999. 77p.

CHOQUET, P.; JUNEAU, F.; DEBREUILLE, P. J.; BESSETTE, J. **Reliability, long-term stability and gage performance of vibrating wire sensors with reference to case histories**. 2002. Disponível em <[http://www.geomonitor.co.kr/upload\\_files2/geomonitor/Uploaded\\_Files/vblong.pdf](http://www.geomonitor.co.kr/upload_files2/geomonitor/Uploaded_Files/vblong.pdf)>. Acesso em 26/02/2014.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia. Disponível em: <[www.copel.com](http://www.copel.com)>. Acesso em: 17/05/2012 às 9h30min.

COPEL. **Relatório de acompanhamento de água de infiltração na barragem da UHE Governador José Richa** (relatório técnico de manutenção SOS/DEGT/VECM-GJR-RT-09/2013). Dezembro, 2013.

CRESPO, A. A. **Estatística fácil**. 19ª edição atualizada. São Paulo: Saraiva, 2009.

ELETROBRÁS. **Critérios de projeto civil de Usinas Hidrelétricas**. Out. 2003.

FLORESTAL CATAGUAZES. Página web compilada. 2003. Disponível em <<http://www.florestalcataguzes.com.br/page4.html>>. Acesso em: 25 fev. 2014

FUSARO, T. C. **Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau** (Dissertação). Ouro Preto, 2007.

GASPAR, A.; LOPEZ-CABALLERO, F.; MODARESSI-FARAHMAND-RAZAVI, A.; GOMES-CORREIA, A. **Methodology for a probabilistic analysis of an RCC gravity dam construction. Modelling of temperature, hydration degree and ageing degree fields**. Engineering Structures, n. 65, p. 99 – 110, 2014.

GEOKON. **Model 4420. VW Crackmeter** (Instruction Manual). 2013. Disponível em <[http://www.geokon.com/content/manuals/4420\\_Crackmeter.pdf](http://www.geokon.com/content/manuals/4420_Crackmeter.pdf)>. Acesso em: 11/05/2014.

GUJARATI, D. N. **Econometria básica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

HUANG, H.; CHEN, B. **Dam seepage monitoring model based on dynamic effect weight of reservoir water level**. Energy Procedia, n. 16, p. 159-165, 2012.

ICOLD - International Commission On Large Dams. **Dam Failures Statistical Analysis**. Bulletin 99, 1995.

\_\_\_\_\_. **Automated Dam Monitoring Systems. Guidelines and case histories**. Bulletin 118, 2000.

INTERTECHNE, LEME, ENGEVIX e ESTEIO. **Usina Hidrelétrica de Salto Caxias. Parecer técnico sobre as fissuras na barragem de CCR**. (Relatório técnico RT-412-04-002). Dezembro, 1999.

JEON, J.; LEE, J.; SHIN, D.; PARK, H. **Development of dam safety management system**. Advances in Engineering Software, n. 40, p. 554-563, 2009.

KOKOSKA, S. **Introdução à estatística: uma abordagem por resolução de problemas**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

LACTEC. **Aplicação de métodos numéricos para o estudo do comportamento termo-estrutural de barragens de concreto e conjugação com instrumentação**. Relatório final ciclo 2001-2002 (Relatório Técnico 4.029.2003-R1). Curitiba, out. 2003.

\_\_\_\_\_. **Aplicação de métodos numéricos para o estudo do comportamento termo-estrutural de barragens de concreto e conjugação com instrumentação**. Relatório 3 (Relatório Técnico 4.677.2004-R1). Curitiba, mar. 2005.

LIRA, S. A. **Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações** (Dissertação de mestrado). Curitiba, 2004.

MAC - The Mining Association of Canada. **Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities.**, 49 p. Canadá, 2005.

MARQUES FILHO, J. **Maciços experimentais de laboratório de Concreto Compactado com Rolo aplicado às barragens** (tese de Doutorado). Porto Alegre, 2005.

MARTINS, G. A.; DOMINGUES, O. **Estatística geral e aplicada**. 4ª edição revisada e ampliada. São Paulo: Atlas, 2011.

MATA, J. **Interpretation of concrete dam behaviour with artificial neural network and multiple linear regression models**. Engineering Structures, n. 33, p. 903 – 910, 2011.

MATA, J.; TAVARES DE CASTRO, A.; SÁ DA COSTA, J. **Time-frequency analysis for concrete dam safety control: Correlation between the daily variation of structural response and air temperature**. Engineering Structures, n. 48, p. 658-665, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª edição. São Paulo: IBRACON, 2008.

MOSER, D. E. **Medidas múltiplas de características de barragens de concreto compactado com rolo utilizando instrumentação por fibra ótica** (dissertação). Curitiba, 2006.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do concreto**. 1ª edição, São Paulo: Pini, 1982.

OLIVEIRA, J. B. V. R. **Manual de operação de barragens de contenção de rejeitos como requisito essencial ao gerenciamento dos rejeitos e à segurança de barragens** (Dissertação). Ouro Preto, 2010.

PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; SWINKA FILHO, V.; SOARES, M. S.; FERREIRA, E. S. **Investigação física-química de uma barragem de concreto com mais de 50 anos de operação**. Cerâmica, São Paulo, v. 58, n. 347, p. 374-380, jul./set. 2012.

ROBSON, C. **Real World Research: a resource for social scientists and practitioner-researchers**. 2nd Edition. Malden: Blackwell Publishers, 2002.

ROGER, J. D. **Lessons learned from the st. Francis dam failure**. Lesson learned from fantastic failures. Geo-Strata, v.6, n.2, march-april 2006. Geolnstitute. p.14-17. Disponível em: <[http://web.mst.edu/~rogersda/st\\_francis\\_dam/lessons\\_learned\\_from\\_the\\_st\\_francis\\_dam\\_failure\(geostrata\\_mar-apr\\_2006\).pdf](http://web.mst.edu/~rogersda/st_francis_dam/lessons_learned_from_the_st_francis_dam_failure(geostrata_mar-apr_2006).pdf)>. Acesso em: 18/05/2012.

SARMENTO, F. J.; MOLINA, P. A.; **Barragem Cambará – PB: o deplecionamento evitaria a catástrofe?**. 2004. Disponível em: <[http://www.acquatoool.com.br/paginas/pub\\_camara.pdf](http://www.acquatoool.com.br/paginas/pub_camara.pdf)>. Acesso em: 05/04/2012.

SARÉ, A. R.; LIGOCKI, L. P.; SAYÃO, A.; GERSCOVICH, D. M. S.; PINHEIRO, G. F.; **Revisão das condições de segurança da barragem de Curuá-Una (PA)**. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba, 2006. v. 4. p.1977 - 1981. Disponível em: <<http://eng.uerj.br/~denise/artigos/taludes/estabilidade/cobramseg2006.pdf>>. Acesso em: 05/04/2012.

SILVA, J. M.; POSSAN, E.; **Contribuições de Itaipu e aplicabilidade da lei 12.334/2010 em pequenas e médias centrais hidrelétricas**. In: VIII Simpósio sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Porto Alegre – RS – 01 a 04 de maio de 2012. T31-A06.

SILVA NETO, M. A.; VILLWOCK, R.; SCHEER, S.; STEINER, M. T. A.; DYMINSKI, A. S. **Técnicas de mineração visual de dados aplicadas aos dados de instrumentação da barragem de Itaipu**. Gest. Prod., São Carlos, v. 17, n. 4, p. 721-734, 2010.

SILVEIRA, J. F. A. **Curso de instrumentação e segurança de barragens** (slides de aula). Curitiba, 2012.

SOARES, M. A.; SEARA, R. W.; FERREIRA, E. S.; REIS, M. M. **Comportamento da vazão de percolação na barragem de CCR da UHE Salto Caxias**. In: III Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens. São Paulo, 2006.

SORTIS, A.; PAOLIANI, P. **Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring**. Engineering Structures, n. 29, p. 110-120, 2007.

SOUNIS, E. L. M. **Bioestatística; princípios fundamentais, metodologia estatística. Aplicação às ciências biológicas**. Curitiba: Imprensa universitária, 1971.

SOUZA, A. **Coeficiente de correlação linear de Pearson** (nota de aula). Açores: UAC. Disponível em <[http://www.aurea.uac.pt/pdf\\_MBA/coef\\_correl\\_Pearson.pdf](http://www.aurea.uac.pt/pdf_MBA/coef_correl_Pearson.pdf)>. Acesso em: 13/02/2014 às 16h50min.

THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M.; GIRARDELLO, V.; SALECKER, J.; **Aplicação de metodologias de inspeção e segurança em barragem do sistema FECOERGS**. In: VI Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Belo Horizonte – MG, 2008. T24 – A10. Disponível em: <[http://www.cerpch.unifei.edu.br/resumo\\_art.php?id=142](http://www.cerpch.unifei.edu.br/resumo_art.php?id=142)>. Acesso em: 01/04/2012.

VALENCIO, N. F. L. S. **O controle das águas como fator de progresso e de risco: as representações institucionais dos Grandes Projetos Hídricos no Nordeste.** In: III ENCONTRO DA ANPPAS, 2006, Brasília-DF.

VIEIRA JUNIOR, L. P.; MACHADO, O. B.; AMARO, P. R.; HELENE, P. **Segurança das barragens de concreto.** Concreto e Construções, nº 42, IBRACON. Mar., Abr., Mai., 2006.

WORLD COMMISSION ON DAMS - WCD. Dams and Development. **A new framework for decision-making.** Earthscan Publications. Londres. 2000. 404p. Disponível em: <[http://www.unep.org/dams/WCD/report/WCD\\_DAMS%20report.pdf](http://www.unep.org/dams/WCD/report/WCD_DAMS%20report.pdf)>. Acesso em: 01/04/2012.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZORZI, R. R., RIGOTI, A. **Aplicação de métodos geométricos para monitoramento da barragem de concreto da UHE Gov. José Richa.** Boletim Paranaense de Geociências, Volume 64-65. 11p. 2011

**APÊNDICE 1**

**Principais legislações internacionais relacionadas à Segurança de Barragens**



**Tabela 32 – Principais legislações internacionais relacionadas à Segurança de Barragens**

<b>País</b>	<b>Lei/ano</b>	<b>Guias ou manuais</b>	<b>Comentários</b>
Argentina	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Decreto n° 239/99 de creación del ORSEP</li> <li>- Electricity Regulatory Framework Law, n°24064/02</li> <li>- Lei n° 15.336 –</li> <li>- Lei n° 24.065 –</li> <li>- Decretos n° 1564 (19/12/1996), n° 928 (08/08/1996) e n° 146 (30/01/1998)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procedimiento General Fiscalización del Manejo de La Emergencia</li> </ul>	Os contratos de concessão apresentam alguns dos critérios a serem adotados pelos concessionários.
Austrália	Water Act de 2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Queensland Dam Safety Management Guidelines February 2002 - State of Queensland (Department of Natural Resources and Mines)</li> </ul>	
Canadá	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dam safety regulation (Règlement sur la sécurité des barrages) Quebec, 2007</li> <li>- Dam Safety act (Loi sur la sécurité des barrages) Quebec, 2007</li> <li>- Alberta Water Act</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Canadian Dam Association (CDA) Dam Safety Guidelines - January 1999</li> <li>- Emergency Preparedness For Flood Emergencies At Dams Guideline August 2003</li> <li>- Alberta Emergency Planning, 2000</li> </ul>	A legislação e os manuais são bastante separados por estado
Espanha	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Ley 2/1985, 21 de jan., sobre Protección Civil</li> <li>*Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas</li> <li>*Real Decreto 407/1992, de 24 de abril – Norma Básica de Protección Civil</li> <li>* Reglamento tecnico sobre seguridad de presas y embalses - 1996</li> <li>*Directriz Básica de Planificación Civil ante El Riesgo de Inundaciones – 1995</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Instrucción para El Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas de 1967</li> <li>* Guia Técnica para La elaboracion de los planes de emergencia de presas - 2001</li> <li>* Instrucción para El Proyecto de Pantanos, 1905</li> <li>* Normas transitorias para Grandes Presas 1960.</li> </ul>	Atualmente o Regulamento só se aplica a barragens do Estado e cuja exploração sejam dependentes do Ministério do Meio Ambiente.
Estados Unidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>*"Presidential Memorandum" de Outubro de 1979</li> <li>*National Dam Safety Program Act of 1996, Public Law 104-303</li> <li>*Dam inspection act, U.S. Congressional Public Law 92-367 08 de agosto de 1972</li> <li>*Dam Safety and Security Act of 2002 (Public Law 107-310)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- FEMA – 93 Federal Guidelines for dam Safety (FEMA)</li> <li>- FEMA-64 - EAP for dam owners (2004)</li> <li>- USACE - Safety of Dams – Policy and Procedures (2003)</li> </ul>	Existem inúmeros Guias e Manuais para segurança de barragens e gerenciamento de risco em vales, variando por estado ou agência federal.
Reino Unido	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Reservoir Act 1930</li> <li>* Reservoir Act 1975 amended by Water act 2003</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Engineering guide to emergency planning for uk reservoirs(DEFRA, 2007)</li> </ul>	

País	Lei/ano	Guias ou manuais	Comentários
França	<p>- Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992. Sur l'eau -Circulaire du 13 juillet 1999 relative à la sécurité des zones situées à proximité ainsi qu'à l'aval des barrages et aménagements hydrauliques, face aux risques liés à l'exploitation des ouvrages</p> <p>- Circulaire interministérielle INTB9400227C du 17 août 1994 relative aux modalités de gestion des travaux contre les risques d'inondations</p> <p>- Circulaire du 28 mai 1999 relative au recensement des digues de protection des lieux habités contre les inondations fluviales et maritimes</p> <p>- Circulaire du 30 avril 2002 relative à la politique de l'Etat en matière de risques naturels prévisibles et de gestion des espaces situés derrière les digues de protection contre les inondations ou les submersions marines</p>	<p>Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations</p>	
Itália	<p>- DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 1° novembre 1959, n. 1363</p> <p>Approvazione del regolamento per la compilazione dei progetti, la costruzione e l'esercizio delle dighe di ritenuta. [Pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana - n. 72 del 24-3-1960]</p> <p>- MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI CIRCOLARE 28 agosto 1986 - n. 1125 Modifiche ed integrazioni alle precedenti circolari 9.2.1985 n. 1959 e 29.11.1985 n. 1391 concernenti sistemi d'allarme e segnalazioni di pericolo per le dighe di ritenuta</p>	<p>- MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI DECRETO 24 marzo 1982 Norme tecniche per la progettazione e la costruzione delle dighe di sbarramento.</p>	
Portugal	<p>O Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), decreto-lei n° 11/90 de 6 de Janeiro de 1990;</p> <p>· O Regulamento de Pequenas Barragens (RPB), decreto-lei n° 409/93 de 14 de Dezembro de 1993.</p>	<p>- Normas de Projecto de Barragens (NPB), portaria n° 846/93, de 10 de Setembro de 1993;</p> <p>- Normas de Observação e Inspeção de Barragens (NOIB), portaria n° 847/93, de 10 de Setembro de 1993</p> <p>- Normas de construção de Barragens – NCB 1998</p>	<p>Existem muitos documentos e artigos publicados pelo IST e LNEC.</p>
Suíça	<p>Ordonnance sur la sécurité des ouvrages d'accumulation (OSOA) du 7 décembre 1998 Le Conseil fédéral suisse</p>	<p>A própria legislação apresenta alguns critérios a serem adotados na gestão do risco e emergência de rupturas.</p>	

Fonte: Balbi (2008)

**APÊNDICE 2**  
**Critérios adotados mundialmente para aplicação da legislação sobre segurança de barragens ou para a necessidade de elaboração de planos de emergência**

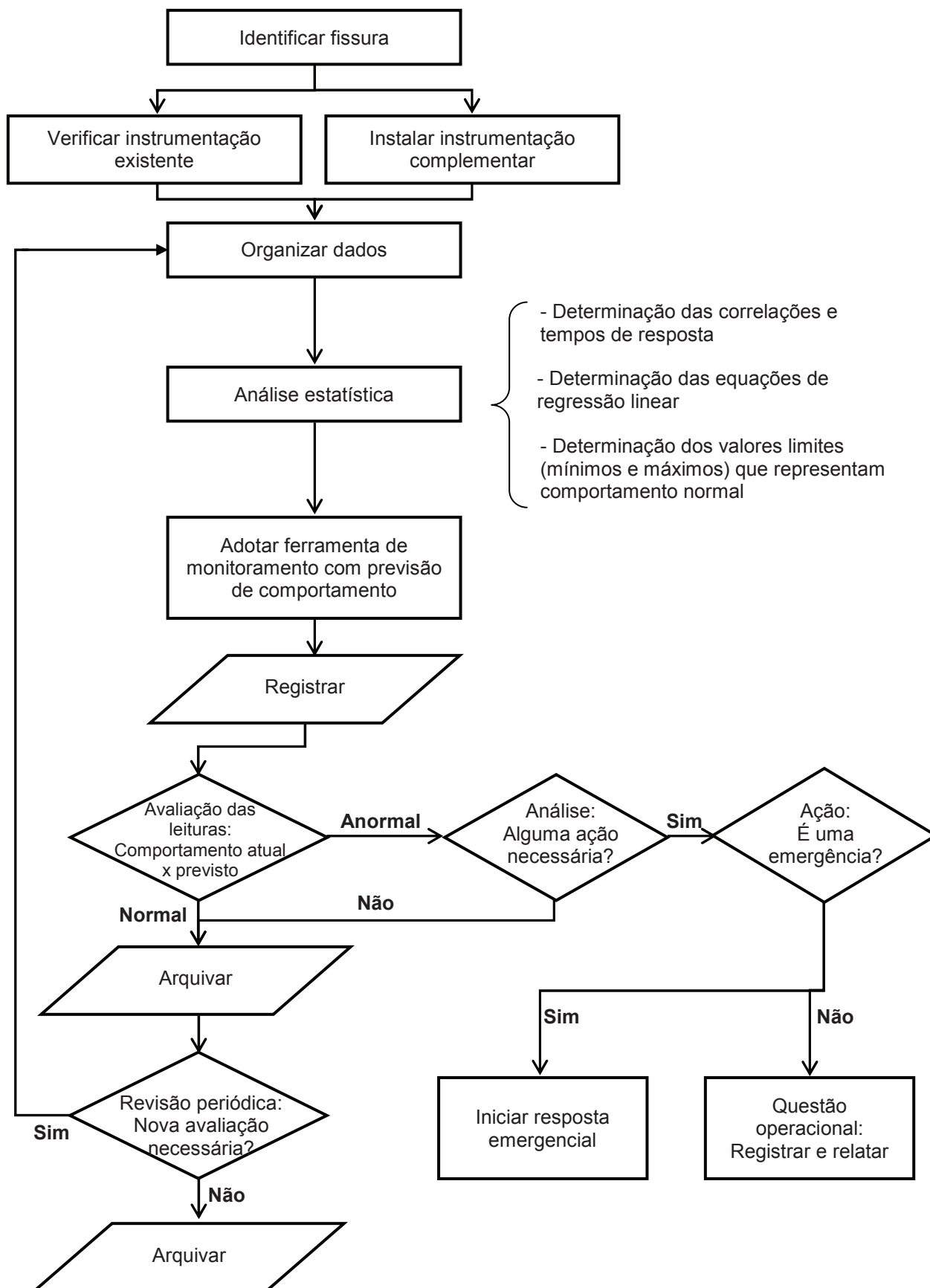
**Tabela 33** – Critérios adotados mundialmente para aplicação da legislação sobre segurança de barragens ou para a necessidade de elaboração de planos de emergência

País/Instituição	Critérios para aplicação da legislação de segurança de barragens	Critérios para obrigatoriedade da Avaliação de Riscos a jusante
ICOLD	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>H &gt; 15\text{m}</math></li> <li>- <math>10 &lt; H &lt; 15\text{ m e}</math>:</li> <li>- <math>L &gt; 500\text{m}</math>, ou</li> <li>- <math>V &gt; 1\text{hm}^3</math>, ou</li> <li>- <math>Q &gt; 2000\text{ m}^3/\text{s}</math></li> </ul>	
Argentina	<p>Não foi encontrada referência aos critérios de definição de barragens que devem seguir as regulamentações.</p> <p>Atualmente todas as concessões privadas são supervisionadas pelo organismo regulador.</p>	<p>Os planos de emergência, quando exigidos, fazem parte dos contratos de concessão, já que não existe legislação específica.</p>
Austrália	<p>Barragens que entram na regulamentação (<i>referable</i>):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Oferecem risco a mais de uma pessoa;</li> <li>- <math>H &gt; 8\text{ m e } V &gt; 0,5\text{ hm}^3</math></li> <li>- <math>H &gt; 8\text{ m}</math>, <math>V &gt; 0,25\text{ hm}^3</math> e a bacia de drenagem é maior que 3 vezes a área do reservatório cheio.</li> </ul> <p>Essas barragens são divididas em duas categorias, conforme o risco oferecido à população a jusante em caso de ruptura:</p> <p>Categoria 1 – 2 a 100 pessoas</p> <p>Categoria 2 – mais de 100 pessoas</p>	<p>A avaliação de impactos é necessária para as que se encaixam na legislação.</p> <p>E, se entrarem nas categorias 1 ou 2, devem ter um manual de controle de cheias.</p>
Canadá	<p>Barragens de alta capacidade</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>H &gt; 1\text{ m e } V &gt; 1\text{ hm}^3</math></li> <li>- <math>H &gt; 2,5\text{ m e } V &gt; 30.000\text{ m}^3</math></li> <li>- <math>H &gt; 7,5\text{ m}</math></li> </ul>	<p>Todas as barragens de alta capacidade.</p>
Espanha	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grandes barragens, conforme regras do ICOLD.</li> <li>- Barragens que apresentem dificuldades especiais em sua fundação ou tenham características não habituais.</li> <li>- Barragens que se encontrem classificadas nas categorias A ou B de risco potencial, conforme abaixo:</li> </ul> <p>Categoria A - Risco a mais de 5 residências habitadas, o que dá um risco potencial médio a 12 ou 15 pessoas;</p> <p>Categoria B - de 1 a 5 domicílios</p>	<p>Apenas as barragens de propriedade do Estado.</p> <p>Mais de uma residência na área de risco</p> <p>Elaborar e implantar o Plano de Emergência de Barragens para as categorias A e B.</p>
Estados Unidos	<p><math>H &gt; 7,60\text{ m e } V &gt; 61.670\text{ m}^3</math></p>	<p>O Guia para elaboração de PAEs do FEMA é para barragens de risco potencial alto ou significativo.</p>
França	<p><math>H &gt; 20\text{ m}</math> ou barragens que implicam perigo para a população</p>	<p><math>H &gt; 20\text{m e } V &gt; 15\text{ hm}^3</math> obriga a planos de emergência.</p>

País/Instituição	Critérios para aplicação da legislação de segurança de barragens	Critérios para obrigatoriedade da Avaliação de Riscos a jusante
Itália	$H > 15 \text{ m}$ e $V > 1 \text{ hm}^3$	Itália prevê que os gestores das barragens sob competência do “Dipartimento per i Servizitecnicinazionali – Servizionazionale dighe” devem atender ao disposto no “Documento de Proteção Civil” que identifica as condições para ativação do sistema de Proteção Civil e procedimentos a serem postos em prática numa situação de contingência em um complexo constituído pela represa e reservatório.
Portugal	Grandes barragens: $H > 15 \text{ m}$ ; $V > 0,1 \text{ hm}^3$ ; ou risco de perdas humanas ou importantes consequências econômicas.	Todas as grandes barragens.
Reino Unido	$V > 25000 \text{ m}^3$	Requer Planos de Ações Emergenciais para a barragem e para o vale a jusante quando a barragem é classificada de alta e média consequência em caso de ruptura. A classificação depende da probabilidade de perda de vidas e danos à propriedade de terceiros.
Suíça	- $H > 10 \text{ m}$ ou $H > 5 \text{ m}$ e $V > 50.000 \text{ m}^3$ - Barragens que representam perigo a pessoas ou bens	Os PAEs são necessários para todas as barragens contempladas na legislação. Para reservatórios com mais de $2 \text{ hm}^3$ é obrigatória a instalação de dispositivos de alarme de cheias nas zonas próximas ao barramento.

H é a altura da barragem, V é o volume do reservatório e L é o comprimento da crista  
Fonte: Balbi (2008)

**APÊNDICE 3**  
**Fluxograma de processo de monitoramento do comportamento das fissuras**  
**térmicas em barragens de concreto gravidade**  
**(sem ilustrações)**



**Figura 90** – Fluxograma de processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade (sem ilustrações)

Fonte: Autora (2014)