

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Albert Luiz Follmann

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA  
PREVISÃO DE DESLOCAMENTOS EM BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM  
FACE DE CONCRETO**

FLORIANÓPOLIS

2021

ALBERT LUIZ FOLLMANN

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA  
PREVISÃO DE DESLOCAMENTOS EM BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM  
FACE DE CONCRETO**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.  
Coorientador: Prof. Wellison José de Santana Gomes, Dr.

FLORIANÓPOLIS

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Follmann, Albert Luiz

Avaliação da aplicabilidade de Redes Neurais Artificiais na previsão de deslocamentos em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto / Albert Luiz Follmann ; orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi, coorientador, Wellison José de Santana Gomes, 2021.

101 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Segurança de Barragens. 3. Instrumentação. 4. Redes Neurais Artificiais. I. Higashi, Rafael Augusto dos Reis. II. Gomes, Wellison José de Santana. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

ALBERT LUIZ FOLLMANN

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA  
PREVISÃO DE DESLOCAMENTOS EM BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM  
FACE DE CONCRETO**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Civil” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil

Florianópolis, 20 de Setembro de 2021.

---

Prof(a). Liane Ramos da Silva, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof.(a) Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.(a)  
Orientador(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.(a) Orlando Martini de Oliveira, Dr.(a)  
Avaliador(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Jaqueline Antunes Ferreira, Eng.  
Avaliador(a)  
Engenheira Civil Geotécnica

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Neura Meneghini e Luiz Carlos Follmann.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Antes de tudo a Deus por ser meu suporte ao longo dessa jornada.

Aos meus pais pela vida e por todo o apoio financeiro, incentivo e educação. Se me tornei o homem que sou devo única e exclusivamente ao que me foi ensinado por vocês. Amo vocês!

Aos meus orientadores Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi e Dr. Wellison José de Santana Gomes, por todos os conhecimentos repassados, incentivo, respeito, gentileza, sugestões e, especialmente, por terem aceitado orientar este trabalho.

A todos os colegas do PET/ECV, com quem dividi momentos felizes da graduação, momentos de trabalho sério e de descontração. Um agradecimento especial ao tutor Dr. Cláudio Cesar Zimmermann, que abriu as portas do PET para que eu pudesse desenvolver meu trabalho, me acolheu e tratou de forma respeitosa e digna no momento em que mais precisava de um incentivo. Obrigado por todos os conselhos.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil, por todos os conhecimentos repassados. Um agradecimento especial ao prof. Dr. Fernando Pelisser, por ter aceitado orientar um trabalho de pesquisa feito durante a graduação.

A todos os colegas do período de Laboratório de Transportes e Logística – LabTrans, em especial ao Eng. Felipe S. dos Santos e Eng. Juliana V. S. Albuquerque, pela confiança depositada em meu trabalho.

A todos os excelentes profissionais da Tractebel Engineering, em especial à equipe de auscultação: Eng. Nestor Santos, Eng. Karina Lopes, Eng. Jaqueline Ferreira, Eng. Leticia Perini e Eng. Pedro Koetz. Obrigado por terem me recebido tão bem, por tudo o que me ensinaram nesse período de estágio, pelas ideias, pelo apoio e pelo companheirismo, tenho aprendido muito com cada um de vocês. Não poderia deixar de agradecer ao Eng. Edgar A. Andrzejewski, que foi fundamental para a realização deste trabalho e ao Eng. Henrique Blasi pela ajuda.

Ao meu amigo Bruno Teles Cordeiro, um grande irmão que a faculdade me deu, parceiro de trabalhos, estudos e brincadeiras. Aos meus amigos João Cena, Guilherme Ambros e Valquir Pacheco. Espero levar a amizade de vocês quatro para a vida.

Aos corajosos e honrosos empreendedores que disponibilizaram seus dados.

## RESUMO

Barragens de Enrocamento com Face de Concreto são estruturas robustas e seguras, entretanto, costumam apresentar grandes deformações que são consequência das propriedades de seus materiais constituintes, da fundação em que são apoiadas ou até mesmo de má compactação. Os mecanismos de deformação do enrocamento não são conhecidos ao ponto de se conseguir prever com precisão, utilizando modelos físicos-matemáticos, as deformações a serem observadas durante a fase de operação dos empreendimentos. Esse trabalho busca estabelecer, com o auxílio das Redes Neurais Artificiais, uma abordagem diferente para a previsão de leituras futuras e a definição de valores de controle da instrumentação de auscultação, utilizando apenas as medições feitas em marcos superficiais, o tempo de monitoramento, as variações do nível do reservatório e as variações de temperatura ambiente. Duas Barragens de Enrocamento com Face de Concreto, localizadas no Brasil, tiveram seus dados analisados e aplicados numa arquitetura de Redes Neurais Artificiais do tipo *Perceptron* de Múltiplas Camadas. A aplicação do modelo de Redes Neurais mostrou que é possível realizar a previsão de leituras futuras para períodos de até 7 anos, com erros da ordem de décimos de centímetros e apresentando resultados melhores que regressões normalmente utilizadas. Com os resultados obtidos, foi sugerida uma abordagem nova para a definição de valores de controle da instrumentação. Os valores de controle obtidos não são ultrapassados no período considerado e ficam próximos aos valores medidos, o que mostra que os valores previstos estão dentro da realidade e servem como um meio de se detectar mudanças de comportamento das estruturas durante a fase de operação dos empreendimentos.

**Palavras-chave:** Instrumentação. Monitoramento. Segurança de Barragens. Inteligência Artificial. Barragens de Enrocamento com Face de Concreto.

## ABSTRACT

Concrete Face Rockfill Dams are safe and reliable structures, however, great values of settlements may occur as a result of its construction material properties, foundation properties or of a lack of compaction during the construction period. The rockfill strain mechanisms are not completely known and this lack of knowledge can lead the numerical models to a wrong or inaccurate prediction of future values of settlements or horizontal displacement, especially for the operation period. With the application of Artificial Neural Networks, this paper is intended to define a different way of predicting future readings for survey points, using only: real survey measurements, monitoring time, variations of the reservoir level and temperature. In this way, two Brazilian Concrete Face Rockfill Dams were analyzed and its data applied into a Multilayered Perceptron architecture. The application of this model shown that it is possible to predict future readings for a period of seven years, with very low error and better than conventionally employed regressions. With the obtained results it became possible to define new control values for the survey points. The obtained control values were not exceeded for the considered period and the predicted measurements were close to these values. This can lead to a new way of detecting changes in the structural behavior of existing dams.

**Keywords:** Instrumentation. Monitoring. Dam Safety. Artificial Intelligence. Concrete Face Rockfill Dam.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção típica de uma barragem de enrocamento .....	20
Figura 2 – Seção da Barragem de Mohale.....	20
Figura 3 – Esquema de funcionamento da Célula Hidráulica de Recalque.....	27
Figura 4 – Célula hidráulica com tubulação dupla – Seção típica.....	28
Figura 5 – Detalhe da instalação de um medidor tipo KM.....	29
Figura 6 – Seção do Medidor USBR (a); Torpedo de leituras(b).....	30
Figura 7 – Seção típica de um Medidor de Recalque Magnético .....	31
Figura 8 – Seções típicas de marco superficial para instalação em enrocamento .....	32
Figura 9 – Seção típica de instalação de um Benchmark .....	33
Figura 10 - Seção transversal típica de um inclinômetro .....	36
Figura 11 – Estrutura de um neurônio humano .....	41
Figura 12 – Estrutura do neurônio artificial .....	42
Figura 13 – Estrutura de uma rede tipo <i>Perceptron</i> de múltiplas camadas.....	49
Figura 14 – Fluxograma do método do estudo .....	54
Figura 15 – Locação dos marcos superficiais, Barragem A, vista superior. ....	56
Figura 16 - Locação dos marcos superficiais, Barragem B, vista superior. ....	57
Figura 17 – Fluxograma do processo de montagem da Rede Neural.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatísticas em acidentes de barragens .....	18
Tabela 3 - Quantitativo de instrumentos instalados.....	55
Tabela 4 – Estrutura da planilha eletrônica utilizada .....	59
Tabela 5 - Recalques nos marcos da Barragem A .....	65
Tabela 6 – Deslocamentos horizontais na Barragem A - Período de operação.....	67
Tabela 7 - Recalques observados na Barragem B - Período de Operação .....	70
Tabela 8 – Deslocamentos horizontais - Barragem B - Fase de operação .....	72
Tabela 9 – Resultados da previsão de recalques na Barragem A (Médias em cm).....	82
Tabela 10 – Resultados da previsão dos deslocamentos na Barragem A (Médias em cm).....	84
Tabela 11 - Resultado das previsões de recalque para a Barragem B (médias em cm) .....	85
Tabela 12 – Resultado da previsão de deslocamentos para a Barragem B (médias em cm)....	87
Tabela 13 – Resultado das previsões por regressão logarítmica e RNAs (Médias em cm) .....	90
Tabela 14 – Quantificação do erro - Rede Neural e regressão logarítmica.....	91
Tabela 15 – Definição de valores de referência .....	94

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BEFC – Barragem de Enrocamento com Face de Concreto

EMA – Erro Médio Absoluto

EMQ – Erro Médio Quadrático

RNA – Rede Neural Artificial

USBR – United States Bureau of Reclamation

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	ACIDENTES COM BARRAGENS .....	18
2.2	BARRAGENS DE ENROCAMENTO E SEU COMPORTAMENTO.....	19
<b>2.2.1</b>	<b>Barragens de Enrocamento com Face de Concreto.....</b>	<b>21</b>
2.2.1.1	<i>Desempenho das Barragens de Enrocamento com Face de Concreto.....</i>	22
2.3	MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS .....	24
<b>2.3.1</b>	<b>Medição de Recalques .....</b>	<b>25</b>
2.3.1.1	<i>Células hidráulicas de recalque (caixas suecas).....</i>	26
2.3.1.2	<i>Extensômetros do tipo KM.....</i>	28
2.3.1.3	<i>Medidores de Recalque – USBR.....</i>	29
2.3.1.4	<i>Medidores de Recalque Magnéticos .....</i>	31
2.3.1.5	<i>Recalques superficiais .....</i>	32
<b>2.3.2</b>	<b>Medição de Deslocamentos Horizontais .....</b>	<b>34</b>
2.3.2.1	<i>Extensômetros magnéticos.....</i>	35
2.3.2.2	<i>Extensômetros múltiplos de haste (tipo KM).....</i>	35
2.3.2.3	<i>Inclinômetros .....</i>	35
2.4	DEFINIÇÃO DE VALORES DE CONTROLE PARA INSTRUMENTAÇÃO .	37
<b>2.4.1</b>	<b>Métodos determinísticos.....</b>	<b>37</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Métodos estatísticos .....</b>	<b>38</b>
2.5	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS .....	39
<b>2.5.1</b>	<b>Analogia entre o cérebro humano e a Rede Neural Artificial .....</b>	<b>40</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Arquiteturas de Redes Neurais Artificiais .....</b>	<b>42</b>

2.5.3	<b>Aplicações das Redes Neurais Artificiais em barragens .....</b>	<b>43</b>
2.5.4	<b>A arquitetura da rede <i>Perceptron</i> de múltiplas camadas.....</b>	<b>45</b>
2.5.4.1	<i>Funções de ativação .....</i>	<i>46</i>
2.5.4.2	<i>Número de camada e neurônios .....</i>	<i>48</i>
2.5.4.3	<i>Sequência de treinamento das redes <i>Perceptron</i> de múltiplas camadas.....</i>	<i>48</i>
2.5.4.4	<i>Avaliação do aprendizado da rede e dos resultados obtidos .....</i>	<i>51</i>
<b>3</b>	<b>MÉTODO .....</b>	<b>54</b>
3.1	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS BARRAGENS.....	54
3.1.1	<b>Apresentação dos empreendimentos.....</b>	<b>55</b>
3.2	ESCOLHA DO INSTRUMENTO DE ESTUDO .....	57
3.3	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS BARRAGENS.....	57
3.4	PREVISÃO DE LEITURAS DE DESLOCAMENTO COM REDES NEURAI ARTIFICIAIS.....	58
3.4.1	<b>Montagem da Rede Neural .....</b>	<b>59</b>
3.4.2	<b>Modelos de previsão .....</b>	<b>63</b>
3.5	COMPARAÇÃO COM REGRESSÕES CONVENCIONAIS .....	63
3.6	DEFINIÇÃO DOS VALORES DE CONTROLE.....	63
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>64</b>
4.1	ANÁLISES DO COMPORTAMENTO DAS BARRAGENS .....	64
4.1.1	<b>Análise do comportamento – Deslocamentos superficiais da Barragem A....</b>	<b>64</b>
4.1.2	<b>Análise do comportamento – Deslocamentos da Barragem B.....</b>	<b>68</b>
4.1.3	<b>Breves comentários quanto ao comportamento de ambas as barragens.....</b>	<b>73</b>
4.2	MONTAGEM DAS REDES NEURAI ARTIFICIAIS .....	74
4.3	PREDIÇÕES REALIZADAS COM O MODELO DE REDES NEURAI .....	75
4.3.1	<b>Modelos de predição .....</b>	<b>75</b>
4.3.2	<b>Previsões na Barragem A.....</b>	<b>80</b>
4.3.3	<b>Previsões na Barragem B .....</b>	<b>84</b>

4.4	REGRESSÃO E A REDE NEURAL .....	88
4.5	PROPOSTA PARA A DEFINIÇÃO DE VALORES DE referência DOS MARCOS SUPERFICIAIS .....	93
4.5.1	<b>Determinação: análise do pior cenário .....</b>	<b>94</b>
5	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>96</b>
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	96
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>97</b>

-

## 1 INTRODUÇÃO

A segurança de obras de engenharia nunca esteve tão em voga como nos últimos anos. No Brasil, com os desastres ocorridos no estado de Minas Gerais, ocasionados pela ruptura das barragens de rejeitos de mineração de Mariana e Brumadinho, todas as atenções foram voltadas às barragens, de todos os tipos e usos. No mundo, conforme apontado por Pereira (2020), a preocupação com o tema de segurança de barragens começou a tomar forma em meados de 1950, entretanto, foi somente após a ruptura da Barragem de Teton, nos Estados Unidos da América, em 1976, que ocorreram os maiores avanços neste campo.

De acordo com USBR (1983), o risco de falha de uma barragem é um dos fardos inevitáveis de uma civilização. A primeira responsabilidade de um engenheiro, segundo a referida fonte, é minimizar essa ameaça, visto que, em nenhuma outra área da engenharia a responsabilidade para com as pessoas é tão grande ou exige tanto cuidado. Salienta-se ainda que programas de Segurança de Barragens são de vital importância para toda a sociedade e urgem por profissionais talentosos e multidisciplinares.

Segundo Pereira (2020), após a ruptura da Barragem de Teton, o *United States Bureau of Reclamation* (USBR) iniciou uma série de estudos que culminaram em resultados importantes para o campo da segurança de barragens. Segundo a pesquisa, cerca de 59% dos acidentes decorrem de causas geológico-geotécnicas, 23% de causas hidrológicas-hidráulicas, 12% por falhas construtivas diversas, 3% por atos de guerra, 2% por operação inadequada e 1% por terremotos. Das falhas geológico-geotécnicas, são mencionados especialmente: deformação na fundação, falhas no contato estrutura-fundação, galgamento ou erosão interna (*piping*).

Nesse contexto, Fell *et al.* (2015) mencionam, entre diversos fatores, a importância de realizar o monitoramento de deslocamentos superficiais em barragens de todos os tipos, pois os movimentos podem ser úteis para checar problemas em desenvolvimento, incluindo desestabilização dos taludes e deformações internas ocasionadas por amolecimento do solo ou por processos de erosão interna no aterro ou na fundação. Os autores ainda apontam que o uso de marcos superficiais se mostra ferramenta importante na identificação precoce destes problemas, possuindo a vantagem de se realizar a checagem das leituras dúbias sempre que necessário.

Conforme abordado por Dunncliff (1983), prever valores máximos para todos os instrumentos instalados é parte importante do processo, pois permite estabelecer a sensibilidade e precisão do sistema de monitoramento. Segundo o autor, a escolha de um valor máximo

possível, ou máximo valor de interesse, leva à definição de uma faixa de comportamento para o instrumento em questão. Além disso, o autor ressalta a importância de se definir valores de controle para a instrumentação, baseados em critérios de performance e de engenharia, pois os mesmos, quando aliados a um sistema de instrumentação bem definido, permitem o reconhecimento de anormalidades e a proposição de medidas corretivas. No caso dos deslocamentos, estes valores costumam ser obtidos de análises tensão-deformação.

Em estudo empreendido por Acosta-González *et al.* (2018), realizou-se a comparação entre os deslocamentos calculados por meio de modelos tensão-deformação para a fase de enchimento do reservatório e fase operacional com os deslocamentos reais observados. Neste estudo, foram observadas diferenças de grande monta entre os recalques estimados e os recalques reais, verificando-se diferença entre 12 e 28 cm quando se comparava o modelo à realidade. Por isso, estabelecer valores de controle considerando apenas os modelos tensão-deformação quando não se dispõe dos parâmetros adequados pode levar à definição de valores de controle distantes da realidade.

Na prática, os valores de controle de deslocamentos são obtidos a partir dos modelos gerados nas fases de projeto. Em muitos casos, os valores de deslocamento observados durante o período operacional diferem consideravelmente dos estimados, visto que, pode ser economicamente inviável investigar todos os parâmetros necessários para compor estes modelos.

Dessa forma, neste trabalho avaliar-se-ão os deslocamentos de barragens de aterro, especialmente as do tipo enrocamento, por meio de um algoritmo de aprendizado de máquina, as Redes Neurais Artificiais (RNAs), visando contribuir com o processo de avaliação de comportamento e determinação de valores de controle para os recalques e deslocamentos horizontais, medidos por marcos superficiais.



## 1.1 OBJETIVOS

Nas seções seguintes estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a aplicabilidade de RNA na predição de deslocamentos em barragens de enrocamento com face de concreto.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a capacidade das RNAs preverem deslocamentos em superfície;
- Observar a possibilidade de generalização do modelo obtido;
- Contribuir para o processo de determinação de valores de controle da instrumentação de auscultação.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta as informações sobre Barragens de Enrocamento com Face de Concreto, os principais instrumentos utilizados nessas barragens para medição de deslocamentos, bem como, uma breve apresentação sobre as RNA e suas aplicações em barragens.

### 2.1 ACIDENTES COM BARRAGENS

Segundo USBR (1983), o número total de barragens já construídas no mundo deve superar 150 mil, no entanto, muitas delas não apresentaram desempenho conforme o desejado. De acordo com a referida fonte, estima-se que desde o século XII, ocorreram cerca de 2 mil acidentes, dentre os quais, aproximadamente 200 ocorreram no século passado, vitimando mais de 8 mil pessoas.

Ainda segundo os estudos publicados por USBR (1983), os registros apontam que as barragens de terra são as envolvidas no maior número de catástrofes, sendo seguidas diretamente por barragens de gravidade, de enrocamento e por último, as em arco. Desses acidentes, cerca de 40% dos acidentes decorrem de problemas com a fundação da barragem e 10% por recalques diferenciais. A Tabela 1 apresenta as estatísticas dos acidentes levantados pela USBR (1983).

Tabela 1 - Estatísticas em acidentes de barragens

<b>Causas das rupturas</b>	<b>Percentual</b>
Falha da fundação	40
Vertedouro inadequado	23
Construção pobre	12
Recalques diferenciais	10
Poropressões elevadas	5
Atos de guerra	3
Deslizamentos de taludes	2
Materiais deficientes	2
Operação incorreta	2
Terremotos	1

Fonte: USBR (1983)

Nos anos seguintes, após a pesquisa publicada pela USBR, Fell *et al.* (2015, apud FOSTER *et al.*, 2000) apresentaram uma classificação por tipos de eventos que ocorreram em barragens no mundo até o ano de 1986. Esses autores concluíram que uma grande parte dos acidentes ocorreram durante a fase de enchimento do reservatório e nos primeiros cinco anos de operação. Além disso, os autores apontam que as barragens mais antigas costumam entrar em colapso quando o monitoramento e as inspeções não conseguem identificar os problemas, ou quando nenhuma ação foi tomada em relação aos problemas notados.

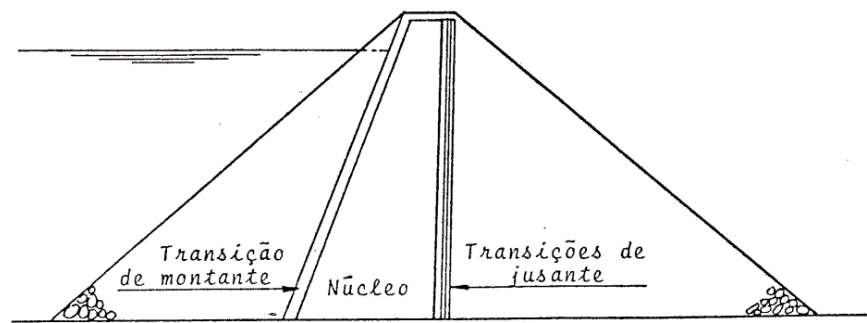
Conforme apontado por Dunicliff (1983), muitos acidentes em obras geotécnicas poderiam ter sido evitados se houvesse a preocupação com o monitoramento geotécnico. Segundo o autor, programas de monitoramento com instrumentos em obras geotécnicas podem ser vistos como um custo adicional por muitos dos projetistas, porém, são extremamente úteis para validar ou invalidar premissas de projeto. Além disso, o valor acrescido à segurança das estruturas e ao potencial de se evitar falhas (economizando com reparos e indenizações) faz com que o custo destes programas sempre compense.

No que concerne à Barragens de Enrocamento com Face de Concreto (BEFC), poucos relatos de acidentes e incidentes são feitos na bibliografia. Um caso de ruptura é mencionado no trabalho de Zhang e Cheng (2006), onde é descrita a ruptura por galgamento da Barragem de Gohou, localizada na China. Nos últimos anos, os relatos de problemas com BEFCs são menores, e restringem-se à eventos associados a sismos (Barragem de Zipingpu - China) e alguns problemas de trincas, fissuras e até mesmo rupturas nas lajes de concreto em decorrência de esforços compressivos (Campos Novos - Brasil, Barra Grande - Brasil e Mohale - Lesoto), conforme descrito no trabalho de Cruz *et al.* (2014).

## 2.2 BARRAGENS DE ENROCAMENTO E SEU COMPORTAMENTO

De acordo com Bordeaux (1979), a barragem de enrocamento abarca um maciço constituído por enrocamentos lançados ou compactados em camadas, cuja impermeabilização pode ser feita através de um núcleo argiloso compactado, vertical ou inclinado, ou através de uma face estanque sobre a superfície de montante. Ainda segundo o autor, a face estanque pode ser constituída de qualquer material com essa propriedade, tal como, concreto ou concreto betuminoso. A Figura 1 apresenta uma seção típica de uma barragem de enrocamento.

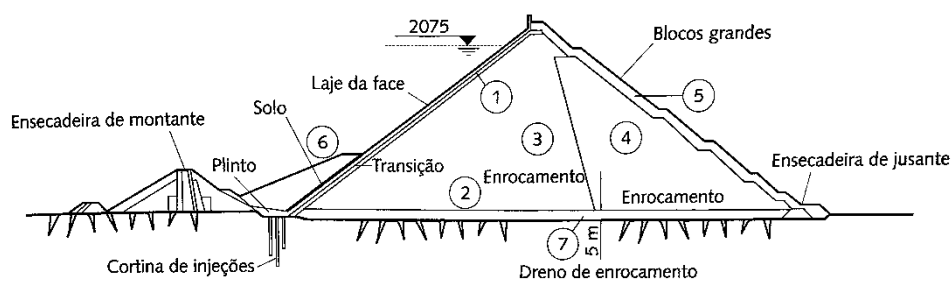
Figura 1 – Seção típica de uma barragem de enrocamento



Fonte: Bordeaux (1979)

Para Cruz *et al.* (2014), o progresso para a construção de barragens de médio e grande porte deve-se à construção de BEFCs. Os autores destacam que essas estruturas se mostram seguras a longo prazo, em termos de estabilidade estática e dinâmica, trazendo o exemplo da Barragem de Zipingpu, com altura de 156m, situada na China, que foi capaz de resistir a terremotos de 8.0 graus na escala Richter sofrendo pequenos danos nas lajes e na crista. A Figura 2 apresenta a seção da BEFC de Mohale, localizada em Lesoto, no continente Africano, onde fica evidente a robustez da estrutura.

Figura 2 – Seção da Barragem de Mohale



Fonte: Cruz *et al.* (2014)

De acordo com Pinto (2007, apud CRUZ *et al.*, 2014) o projeto das BEFCs sempre foi guiado pela experiência e não por teorias. Para o autor, os métodos numéricos para BEFCs consistem em uma ferramenta promissora e em desenvolvimento, sendo que ainda não alcançaram o estágio para se tornarem o principal objeto de projeto das BEFCs, prevalecendo os critérios empíricos como a melhor forma de se tomar decisões em fases de projeto.

Nesse sentido, Cruz *et al.* (2014) reforçam que o projeto empírico prevalecente nas BEFCs nos últimos 50 anos vem sofrendo modificações e melhorias. Para os autores, isso decorre da grande instrumentação que tem sido feita nessas estruturas. No entanto, Cruz *et al.* (2014) comentam que os incidentes observados em barragens como Campos Novos (Brasil), Mohale (Lesoto) e Barra Grande (Brasil) têm mostrado que os mecanismos de transmissão de tensões nos enrocamentos não são ainda bem conhecidos e que se faz necessário um novo instrumento capaz de identificar os deslocamentos tridimensionais do enrocamento, visto que, os únicos instrumentos que apontaram algo antes destes incidentes foram marcos superficiais, que forneceram informações apenas sobre a face externa das barragens.

De acordo com Cruz *et al.* (2014), os grandes responsáveis no mundo por consolidar o desenvolvimento da técnica de projeto e construção das BEFCs foram os engenheiros James Barry Cooke e James L. Sherard. Para Cruz *et al.* (2014), estes engenheiros contribuíram de forma preponderante no desenvolvimento deste tipo de solução de engenharia, sendo o zoneamento proposto por Cooke e Sherard (1987) uma das mais importantes contribuições para o avanço das BEFCs.

## **2.2.1 Barragens de Enrocamento com Face de Concreto**

O termo enrocamento, para Bordeaux (1979), é utilizado para definir um conjunto não coesivo de fragmentos de rocha, cuja distribuição granulométrica apresenta no máximo 30% de material passante na peneira n° 4 e cujas partículas que essencialmente o constituem são maiores que meia polegada. Este conceito, segundo o autor, se aplica a cascalho natural ou artificial, pedras, matações e fragmentos rochosos de pedreiras.

Quando o maciço de enrocamento possui muitos finos em sua composição, Bordeaux (1979) salienta que ele não pode mais ser tratado como de enrocamento, visto que, o comportamento mecânico e a percolação serão governados pela fração fina.

A ideia de se facear uma barragem de terra ou enrocamento com um material impermeável é muito antiga, conforme aponta Cruz (1996). O autor ainda salienta que a solução mais promissora para emprego e construção de barragens de enrocamento é a solução de enrocamento compactado, com uma fina face de concreto armado e juntas apenas no sentido longitudinal, apoiadas sobre um material mais fino, muitas vezes tratado com emulsão asfáltica. À região de contato entre a laje e a fundação se dá o nome de plinto. Essa região, segundo Cruz (1996), deve receber tratamento similar ao usado em fundações de concreto.

Atualmente, segundo Cruz *et al.* (2014), os países que mais dominam a técnica de projetar e construir BEFCs são a China e o Brasil, o que é comprovado pela grande quantidade dessas estruturas nos países, e pelas alturas que as mesmas vêm atingindo.

#### 2.2.1.1 Desempenho das Barragens de Enrocamento com Face de Concreto

De acordo com Cruz *et al.* (2014), a avaliação de desempenho de uma BEFC deve sempre ser feita com relação, em primeiro lugar, às vazões de percolação observadas e, em segundo lugar, aos deslocamentos medidos tanto no maciço de enrocamento, quanto nas lajes. Entretanto, segundo os autores, vazões e deslocamentos não são dissociáveis e estão diretamente interligados, já que quanto maiores os deslocamentos observados, maiores as vazões lidas.

Em relação às perdas d'água ou à vazão que percola nos enrocamentos, Cruz *et al.* (2014) reforçam que a ordem de grandeza observada atualmente é muito menor que a necessária para instabilizar qualquer bloco no lado de jusante. O monitoramento, segundo os autores, se faz necessário para identificar problemas com a laje de concreto e para avaliar possíveis perdas econômicas (perda de potencial hídrico).

Conforme apontado por Silveira (1982), durante períodos como o de construção, enchimento do reservatório e operação de barragens de terra ou enrocamento, ocorrem variações no estado de tensões totais e neutras, bem como, desenvolvem-se efeitos secundários com o tempo, responsáveis por ocasionar deformações internas. Os fatores que influenciam, segundo o autor, são movimentos na fundação, formato do vale, transferência de carga entre zonas de diferente deformabilidade, carregamento pelo enchimento do reservatório, entre outras.

Quanto aos deslocamentos, Cruz *et al.* (2014) apresentam o comportamento típico que ocorre ao longo das fases de construção e operação das BEFCs. Conforme apontado pelos autores, em geral, os recalques acompanham a construção do aterro, aumentando seguindo velocidade praticamente constante e havendo um novo deslocamento quando há o início do enchimento do reservatório. Nos anos de operação, são registrados aumentos contínuos com o passar do tempo, em decorrência da fluência sofrida pelo enrocamento, fenômeno este ocasionado pela acomodação progressiva dos blocos rochosos e pela mudança de arranjo estrutural decorrente do esmagamento do contato entre blocos. Segundo Larrahondo *et al.* (2014), o mecanismo de deformação de enrocamento pode ser compreendido analisando o seu

comportamento a baixas e altas tensões. Em baixas tensões, ocorre apenas o rearranjo das partículas do enrocamento sob ação do carregamento. Já em altas tensões, ocorre o imbricamento das partículas rochosas, que se quebram e se esmagam. O comportamento de altas tensões é conhecido como “escoamento clástico”.

Quantificando estes comportamentos, de acordo com Larrahondo *et al.* (2014), a Barragem de La Esmeralda na Colômbia (com altura de 237m) apresentou recalques de até 2,57m, o que em termos de deformação específica representa cerca de 1% da altura da barragem. Segundo Hunter e Fell (2003, apud LARRAHONDO *et al.*, 2014), são considerados normais recalques específicos de até 1,1%.

O trabalho de Seo *et al.* (2009) reforça que há muito tempo se tenta prever os recalques das cristas das barragens, pois, o galgamento, que consiste no extravasamento do material contido pelo reservatório, é um grande problema em barragens de enrocamento. Conforme exposto por Fell *et al.* (2005 apud SEO *et al.*, 2009), as deformações específicas na crista de BEFCs costumam variar entre 0,02 e 0,05% da altura do enrocamento em relação à fundação para fundações de boa qualidade e alta resistência e entre 0,10 a 0,15% da altura do enrocamento em enrocamento com resistência e mineralogia de qualidade intermediária ou boa. Seo *et al.* (2009), no entanto, reforçam que barragens como a de Xingó (Brasil), Itá (Brasil) e Tianshenqiao (China) apresentaram recalques específicos de, respectivamente, 0,35%, 0,48% e 0,60%, o que é consequência de baixos módulos de deformabilidade do enrocamento em Xingó ( $E_v = 32\text{MPa}$ ) e da altura em Tianshenqiao (178 m).

Um segundo aspecto a ser considerado em termos de deslocamentos, de acordo com Cruz *et al.* (2014), é o formato do vale. Segundo os autores, o efeito de arqueamento que ocorre varia consideravelmente entre vales abertos e fechados. Para analisar os efeitos do formato do vale, Pinto e Marques Filho (1998, apud CRUZ *et al.*, 2014), propuseram que a forma do vale deveria ser verificada conforme a Equação 01, onde  $A$  é a área da face e  $H$  é a altura da barragem.

$$FV = \frac{A}{H^2} \quad (1)$$

Ainda segundo Pinto e Marques Filho (1998, apud PAUSZ *et al.*, 2016), considera-se uma barragem encaixada em um vale fechado quando o fator de forma do vale, definido pela

relação entre a área da face e a altura (Equação 01, for de 3,5. Fatores de forma do vale maiores que isso indicam que o vale é aberto.

O efeito de arqueamento é observado na Barragem de La Esmeralda, na Colômbia. Em estudo conduzido por Larrahondo *et al.* (2014), a Barragem de La Esmeralda, cujo monitoramento iniciou em 1976, apresentou arqueamento na crista, onde foram observados deslocamentos horizontais de até 29 cm nas zonas centrais e pequenos deslocamentos para montante na região das ombreiras.

No que concerne aos deslocamentos horizontais Cruz *et al.* (2014) comentam ainda que é muito comum que seja monitorado o deslocamento apenas no sentido montante-jusante em decorrência das limitações dos instrumentos de medida. Durante a fase construtiva, é natural que os deslocamentos variem entre montante e jusante, porém, após o início do enchimento do reservatório, o deslocamento passa a ser sempre à jusante. Além disso, os autores destacam que quando são analisados os deslocamentos resultantes (verticais e horizontais), nota-se que em BEFCs construídas em vales fechados há uma concentração de tensão na região central da laje de montante, com deslocamentos resultantes de maior intensidade nesta área.

Por fim, para Silveira (1982), com o advento de métodos numéricos tais como o método dos elementos finitos, foi possível incrementar as análises de deformação e deslocamentos em barragens. Na opinião do autor, mesmo com algumas discrepâncias observadas entre as deformações indicadas pelos modelos e as observadas, acredita-se que com a evolução dos ensaios, bem como com a realização de retroanálises, será possível avaliar as tensões e deformações de forma prévia, tanto para o período construtivo como para o de enchimento do reservatório, com uma boa margem de confiança.

### 2.3 MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS

De acordo com Silveira (1982), os objetivos de medir a deformação e os deslocamentos em barragens são, principalmente, dois: a segurança e a necessidade de conhecer melhor os conceitos básicos de projeto e características mecânicas (tensão-deformação) de solos e enrocamentos. De modo complementar, para Dunicliff (1982) é obrigação do engenheiro construir estruturas seguras. Conforme exposto por Dunicliff (1982), monitorar estruturas ao longo de sua operação, utilizando-se de observações e instrumentação, deve ser a maneira mais conveniente de se garantir durabilidade e a segurança das mesmas.



A checagem das condições de projeto, segundo Fusaro (2007), normalmente é feita com instrumentos instalados em barragens novas. Segundo a autora, quando os instrumentos são instalados nas estruturas em operação, estes servem para fornecer informações de comportamento que possam vir a gerar algum impacto na segurança das estruturas, ou, até mesmo identificar mudanças operacionais.

No contexto das rupturas de barragens, segundo Silveira (1982), estes eventos – exceto os ocasionados por catástrofes –, quase sempre apresentam sinais de alerta, tais como: fissuras, surgências d'água, aumento nas velocidades de deformação, mudança brusca de deformação específica e subpressões ou poropressões elevadas. De acordo com o referido autor, estes sinais também podem ser identificados sem estarem associados a uma ruptura em potencial.

De acordo com Fell *et al.* (2015), os dados mais valoráveis para detecção de instabilidades e erosão interna em aterros existentes ou fundações são os obtidos pelo monitoramento a longo prazo das deformações. Para os autores, em avaliações de barragens existentes o conhecimento preciso da posição da superfície fornece informações sobre:

- Movimentos de massa existentes – Ex: Rupturas rotacionais;
- Recalque da fundação; e
- Deformação e deslocamentos das estruturas.

Para Cruz *et al.* (2014), em BEFC, os deslocamentos horizontais e verticais durante a construção e o enchimento do reservatório são as grandezas mais importantes para monitorar, devido à influência dos mesmos sobre a movimentação da laje de concreto. Sendo assim, segundo Silveira (2006), devido à variabilidade inerente aos materiais geotécnicos, não se deve utilizar um único instrumento como indicador de desempenho, mas sim, uma combinação de vários tipos diferentes, de modo a permitir uma verificação cruzada das informações.

Tendo em vista o exposto, as seções seguintes discorrem sobre os instrumentos utilizados no acompanhamento de deformações e deslocamentos em barragens de enrocamento.

### **2.3.1 Medição de Recalques**

De acordo com Silveira (1982), deslocamentos verticais são consequência, na maioria dos casos, de compressões volumétricas, que asseguram melhores condições de estabilidade da barragem. Para o autor, os problemas causados por recalques relacionam-se ao surgimento de

trincas em pontos onde ocorrem recalques diferenciais elevados, em ombreiras rochosas íngremes, em abraços com estruturas de concreto e em zonas de transição.

As medições de recalque em barragens de terra ou enrocamento constituem um requisito importante do plano de instrumentação, com enfoque para a supervisão de suas condições de segurança durante o período construtivo, a fase de enchimento do reservatório e o período operacional. São medições importantes e podem ser realizadas com instrumentos de boa precisão, alta confiabilidade e custo relativamente baixo, alguns dos quais confeccionados na própria obra. (SILVEIRA, 2006, p.204)

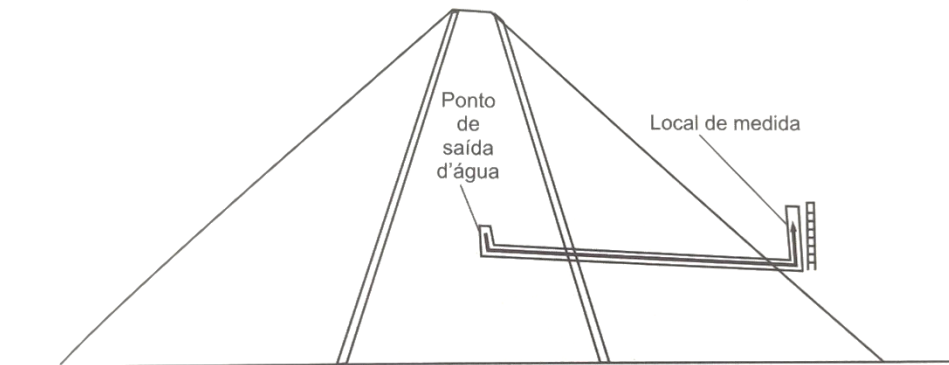
Conforme abordado por Fusaro (2007), as principais deformações verticais a se monitorar são os recalques superficiais, recalque no interior do maciço, deformações do maciço e os recalques da fundação. Para isso, são utilizados diferentes instrumentos ao longo de todo o corpo da barragem.

O monitoramento no interior do enrocamento, segundo Cruz *et al.* (2014) normalmente é feito com o uso de instrumentos como as células hidráulicas de recalque, comumente chamadas de caixas suecas, os Extensômetros tipo KM (Abreviação para Komesu e Matuoko, sobrenomes de seus inventores), os Medidores de Recalque USBR e Medidores de Recalque Magnético.

#### *2.3.1.1 Células hidráulicas de recalque (caixas suecas)*

De acordo com Silveira (2006), célula hidráulica de recalque é um instrumento instalado em barragens de enrocamento (interior do maciço) para a medição de recalques em relação a uma cabine posicionada no talude de jusante. Seu funcionamento, segundo o referido autor, se dá pelo princípio dos vasos comunicantes. A Figura 3 ilustra o esquema de funcionamento do instrumento, onde é possível ver o ponto de medição no interior do núcleo e o local de medida na face de jusante.

Figura 3 – Esquema de funcionamento da Célula Hidráulica de Recalque

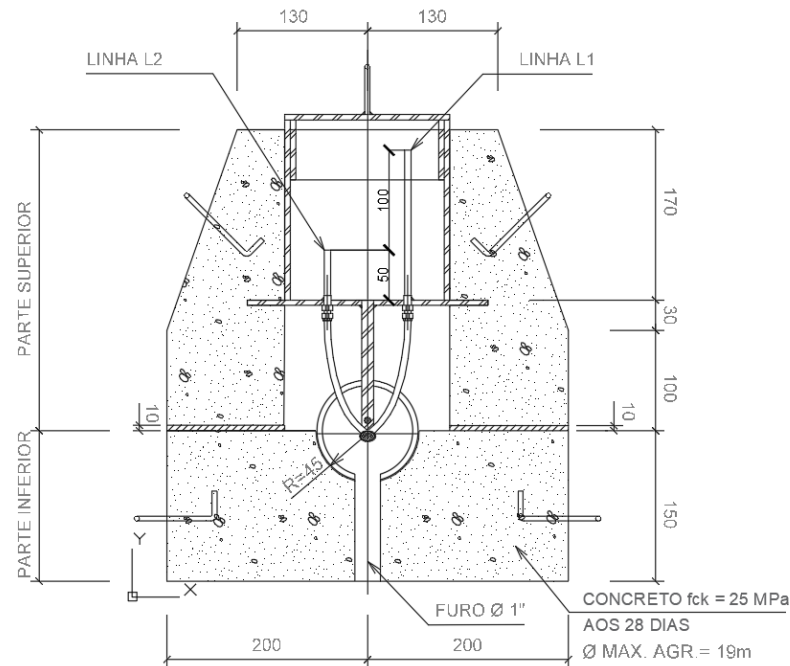


Fonte: Silveira (2006)

Segundo Silveira (2006), em barragens de enrocamento não são necessárias tubulações destinadas a garantir a pressão atmosférica e a permitir a drenagem da água do interior da célula, visto que, o maciço à jusante do núcleo é permeável o suficiente para garantir a pressão atmosférica no interior do dispositivo, bem como permitir a drenagem do excesso de água. Portanto, uma tubulação deve ser suficiente para permitir a leitura do instrumento.

De acordo com Cruz *et al.* (2014), durante a elevação do aterro de enrocamento, o próprio peso do enrocamento, ou até mesmo a passagem de veículos, podem levar à formação de ondulações na tubulação e a incorporação de ar nas mangueiras, o que gera desvio nas leituras. Dessa forma, Silveira (2006) aponta que melhorias foram feitas ao longo dos anos, criando-se um sistema de tubulações duplas, instaladas com uma diferença de 100mm. Esse novo sistema, segundo o autor, permite avaliar a presença ou não de ar incorporado nas mangueiras, pois, caso o desnível na cabine de leitura seja superior ou inferior ao desnível de instalação, é sinal que há alteração nas leituras. Neste caso, basta realizar a recirculação do dispositivo com água de-aerada. A Figura 4 apresenta um exemplo da célula com tubulação dupla, instalada na BEFC Xingó, onde é possível ver o desvio de 100mm entre as mangueiras.

Figura 4 – Célula hidráulica com tubulação dupla – Seção típica



Fonte: Adaptado de Silveira (2006)

Estes instrumentos são muito utilizados em barragens de enrocamento, não só no Brasil. Os trabalhos de Zhou *et al.* (2011) e de Feng *et al.* (2020) analisam as deformações internas e externas de barragens de enrocamento com face de concreto e com núcleo asfáltico, respectivamente, ambas localizadas na China, onde fazem-se presentes células hidráulicas de recalque espalhadas por diversas seções das barragens.

Por fim, conforme apontado por Silveira (2006), em barragens onde não se utilizou o sistema de tubulação dupla, frequentemente ocorrem saltos nas leituras em virtude da presença de ar incorporado nas tubulações, que podem não ser facilmente detectados, justamente pela ausência do desnível de instalação. Após a aplicação do sistema de tubulação dupla, a sensibilidade do instrumento passou a ser de  $\pm 1$  mm, o que o tornou bastante preciso para medição de recalques em barragens de enrocamento.

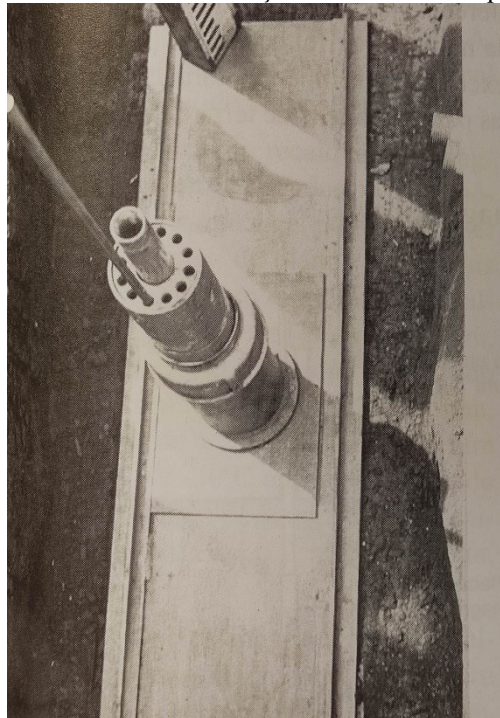
### 2.3.1.2 Extensômetros do tipo KM

De acordo com Bordeaux (1979), o medidor tipo KM foi projetado no Brasil e instalado pela primeira vez na Barragem de Promissão. Consiste em um dispositivo dotado de placas presas a hastes verticais, que percorrem toda a extensão do maciço, e externamente a

essas hastes há um tubo de proteção. Esse tubo, de acordo com Silveira (2006), inicialmente era retilíneo, porém, por conta de problemas observados na Barragem de Promissão e Ilha Solteira, passou a ser telescópico, o que permitiu evitar possíveis esmagamentos do instrumento por conta de acomodações do aterro.

A Figura 5 apresenta o trecho de um Extensômetro tipo KM, onde é possível observar a placa ao fundo, o tubo telescópico e uma haste saindo do dispositivo.

Figura 5 – Detalhe da instalação de um medidor tipo KM



Fonte: Silveira (2006)

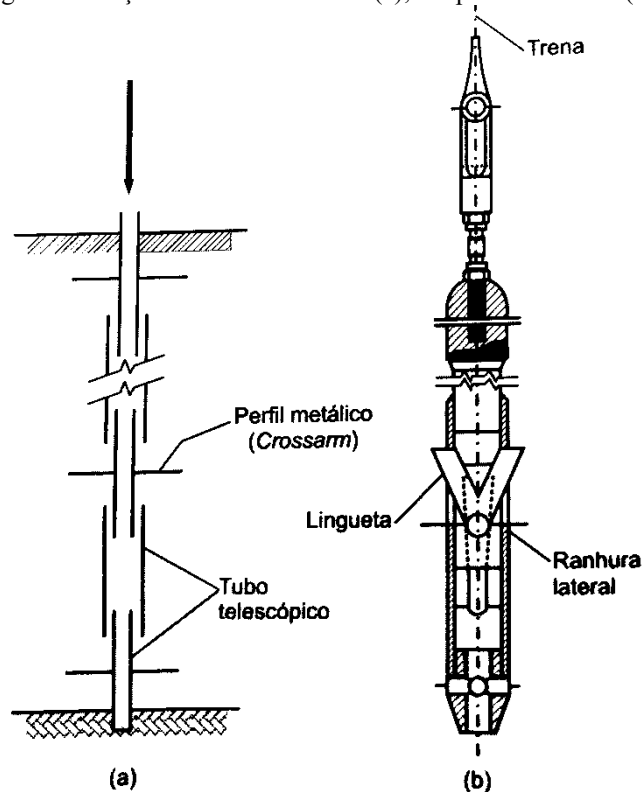
Conforme abordado por Cruz *et al.* (2014), em muitas barragens brasileiras as placas destes instrumentos foram instaladas na vertical, em conjunto com células hidráulicas de recalque de modo que os tubos ficaram dispostos horizontalmente e passaram a servir para a medição de movimentações horizontais dos aterros (sentido montante-jusante).

#### 2.3.1.3 Medidores de Recalque – USBR

Os medidores de recalque USBR levam este nome, segundo Silveira (2006), por terem sido desenvolvidos pelo *Bureau of Reclamation*, nos Estados Unidos. São constituídos por tubos telescópicos solidarizados a vigas “U”, que podem ser instalados em qualquer ponto do

maciço e em qualquer quantidade, o que permite tomar vários pontos de medição ao longo dos aterros. Conforme exposto por Dunnycliff (1988), as leituras são realizadas mediante a inserção de um torpedo especial, denominado de *crossarm gage*, ou ainda, torpedo USBR. A Figura 6 apresenta uma seção transversal do tubo telescópico e da sonda utilizada para a realização das leituras.

Figura 6 – Seção do Medidor USBR (a); Torpedo de leituras(b)



Fonte: Dunnycliff (1988, apud SILVEIRA, 2006)

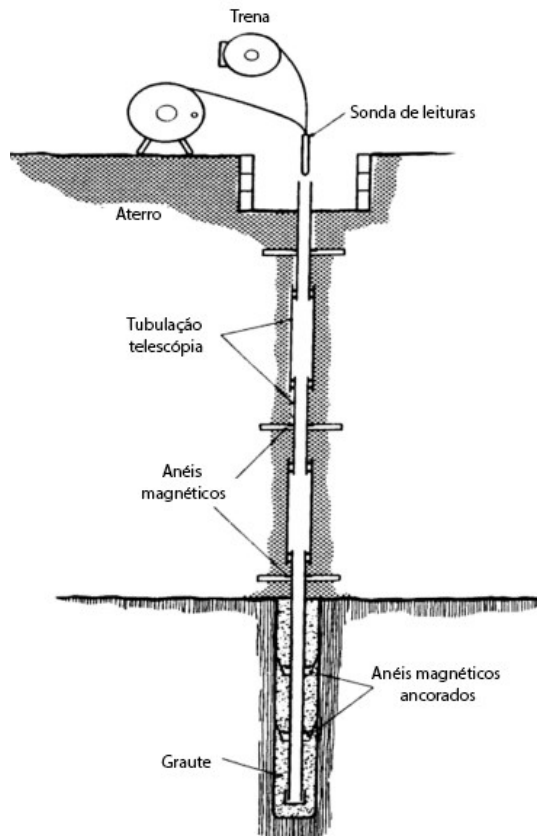
Conforme apontado por Silveira (2006), os medidores USBR pararam de ser utilizados no Brasil há mais de duas décadas. De acordo com o autor, o tempo despendido na realização de leituras é muito grande e a equipe precisa ser altamente treinada para evitar erros de leitura. Assim, Silveira (2006) ressalta que os dispositivos foram sendo substituídos por extensômetros do tipo KM e do tipo magnético, pois, estes últimos são mais simples, mais precisos e em muitos casos podem ser confeccionados na própria obra.

#### 2.3.1.4 Medidores de Recalque Magnéticos

De acordo com Dunicliff (1988), o medidor de recalque magnético consiste em uma série de anéis magnéticos metálicos que circundam uma tubulação telescópica plástica. De acordo com o autor, este instrumento foi concebido pelo *Building Research Establishment*, da Inglaterra, e uma versão melhorada foi feita por brasileiros. A versão brasileira recebe uma sonda simplificada, com uma trena acoplada, e quando a sonda passa pelos anéis magnéticos ela é sensibilizada e emite um aviso sonoro ao operador, que pode fazer a leitura da profundidade do anel considerado.

A Figura 7 apresenta uma seção genérica típica de um medidor de recalque magnético, onde é possível observar a estrutura do instrumento e inferir o processo de realização das leituras.

Figura 7 – Seção típica de um Medidor de Recalque Magnético



Fonte: Adaptado de Fell *et al.* (2015)

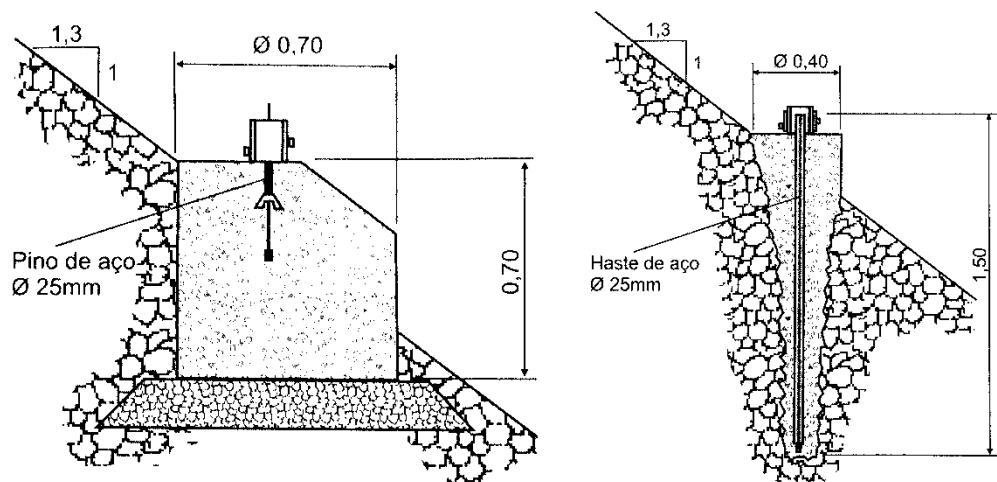
Os medidores magnéticos, segundo Silveira (2006), também podem ser chamados de extensômetros de sonda magnética, pois, podem ser instalados horizontalmente ou em outra direção qualquer, com extensão de até 200m, apresentando sensibilidade de  $\pm 1$  mm. Além disso, o autor salienta a importância de se instalar a base do instrumento na rocha de fundação, de modo a garantir um referencial fixo.

### 2.3.1.5 Recalques superficiais

De acordo com Silveira (2006), a instalação de marcos superficiais nas cristas e bermas de barragens constitui um dos métodos mais antigos e simples de observar deslocamento em barragens de terra e enrocamento. Para Fell *et al.* (2015), os marcos superficiais devem ser instalados ao longo de toda a crista da barragem, taludes de jusante e montante, e não somente em seções esporádicas, visto que uma de suas maiores vantagens é a possibilidade de detectar recalques de grandes magnitudes. Ainda para Silveira (2006), em barragens de enrocamento deve-se prever maior dimensão e robustez nestes dispositivos, para que os mesmos permitam ler os recalques do enrocamento e não de um bloco isolado.

A Figura 8 apresenta duas seções típicas de marco superficial. De acordo com Silveira (2006), a configuração dos dispositivos apresentados na Figura 8 é a indicação para instalação em barragens de enrocamento, justamente por serem mais robustos.

Figura 8 – Seções típicas de marco superficial para instalação em enrocamento

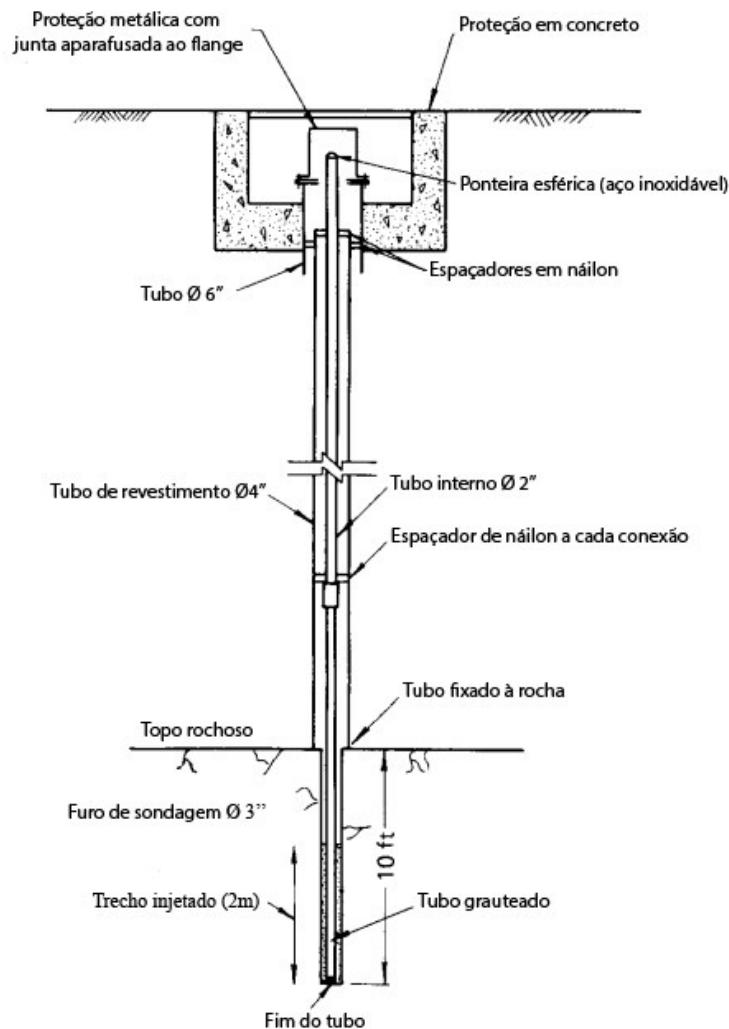


Fonte: Adaptado de Silveira (2006)



Conforme exposto por Silveira (2006), a medição dos deslocamentos dos marcos superficiais exige a instalação de estações topográficas na região das ombreiras, normalmente conhecidas como marco de referência ou *benchmark*. Quanto ao local de instalação de tais estações de referência, Silveira (2006) salienta que é importante garantir a instalação em substrato indeslocável, preferencialmente em rocha, com ancoragem mecânica, hidráulica ou de injeção de calda de cimento (mais comum). A quantidade de referências dependerá da extensão da barragem e das condições do local. A Figura 9 apresenta um esquema típico de instalação destes marcos referenciais.

Figura 9 – Seção típica de instalação de um Benchmark



Fonte: Adaptado de Dunnycliff (1988)

Por fim, de acordo com Silveira (2006), em barragens brasileiras, normalmente muito extensas, é interessante que sejam instaladas mais de uma estação de referência em cada ombreira, pois, é possível melhorar a visada com leituras de ré e vante. Além disso, Silveira (2006) reforça a possibilidade de realizar as leituras com nivelamento direto (geométrico), usando uma mira Invar, ou indireto (teodolito), sendo a primeira opção a ideal dada a elevada precisão do método.

### 2.3.2 Medição de Deslocamentos Horizontais

Para Silveira (1982), enquanto os recalques decorrem de deformações volumétricas, as deformações horizontais se desenvolvem principalmente por deformações cisalhantes. Assim, a medição de deformação horizontal constitui um ótimo método para controlar condições de estabilidade.

A detecção de deslocamento cisalhantes concentrados em determinados trechos da fundação ou aterro pode sinalizar uma condição de instabilidade em potencial, devendo merecer mais atenção. Geralmente, um único método não é suficiente para indicar um eventual problema de estabilidade, devendo-se sempre analisar os dados da instrumentação com base em mais de um método. (SILVEIRA, 2006, p.275)

Para medir os deslocamentos horizontais, Silveira (1982) classifica os instrumentos em:

- Instalados em posição vertical: inclinômetros;
- Instalados em posição horizontal: extensômetro magnético e extensômetro múltiplo de hastes;
- Instalados superficialmente: marcos superficiais.

Segundo Silveira (2006), no período em que se decidiu iniciar o monitoramento de deslocamentos horizontais em barragens, pensou-se em utilizar os instrumentos que já vinham sendo utilizados na medição de recalques, porém, para medir deslocamentos horizontais.

Assim, tendo em vista que os extensômetros magnéticos (adaptação dos medidores de recalque magnéticos), extensômetros múltiplos de haste (adaptação do Extensômetro KM) e marcos superficiais já foram discutidos no tópico de recalques, as seções a seguir que tratam destes instrumentos discorrem sobre as modificações feitas nos dispositivos para a observação de deslocamentos horizontais. Cabe salientar que o marco superficial não possui diferenciação para a leitura na horizontal, e por este motivo não foi apresentado novamente.

### *2.3.2.1 Extensômetros magnéticos*

Um dos primeiros empregos dos medidores magnéticos em posição horizontal, segundo Silveira (2006), foi feito na Barragem de Gepatsch, na Áustria, em 1965. Este autor, afirma também que para permitir que o torpedo de leitura fosse inserido no dispositivo, previu-se um sistema de polias e cabos, dispondo o final do tubo de uma polia e o ponto de realização de leituras de outra polia, acionada por uma manivela, que permitia ao torpedo correr livremente dentro do tubo.

Conforme exposto por Silveira (2006), em barragens de enrocamento este instrumento não é mais utilizado, visto que em muitos casos os recalques diferenciais entre o núcleo da barragem e o enrocamento de jusante acabavam por provocar atrito nos cabos, que levava à ruptura dos mesmos e muitas vezes à perda dos torpedos de leitura no fundo dos tubos.

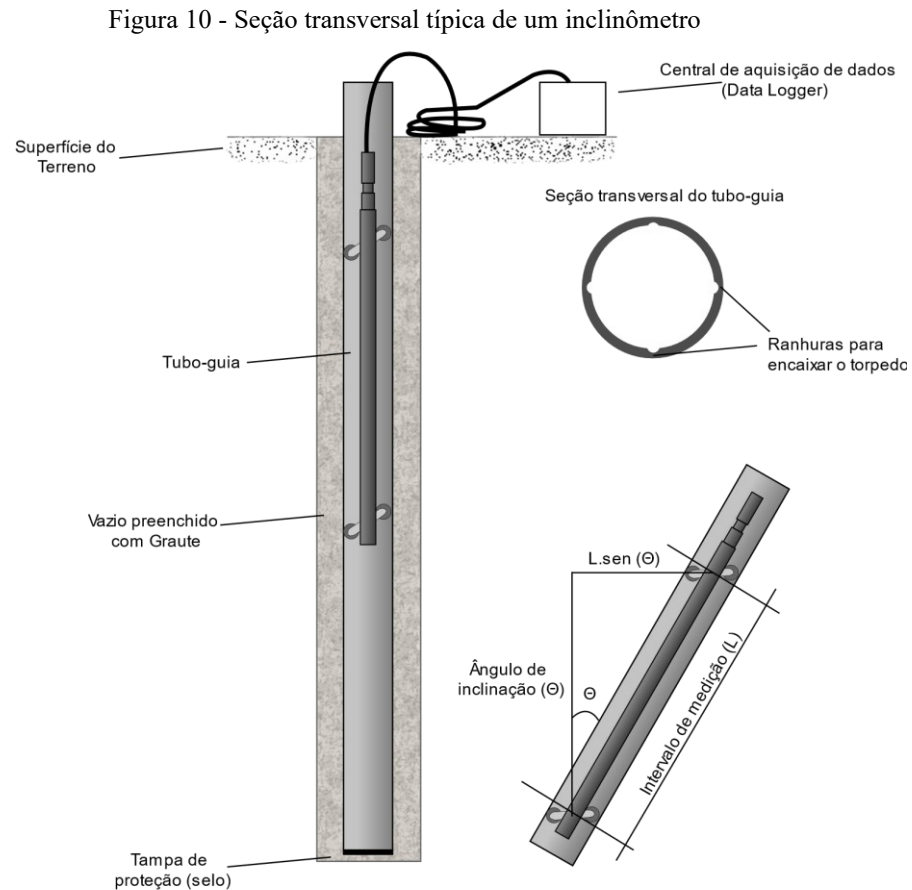
### *2.3.2.2 Extensômetros múltiplos de haste (tipo KM)*

A instalação dos Extensômetros tipo KM em posição horizontal, de acordo com Silveira (2006) foi cogitada após o excelente desempenho observado em várias barragens brasileiras na medição de recalques. O primeiro teste, segundo Silveira (2006), foi feito na BEFC Xingó em 1994, onde se observou um excelente comportamento durante a construção do aterro e um comportamento não tão bom durante a fase de enchimento do reservatório. Na época, conforme abordado por Silveira (2006), acreditava-se que as hastes estavam girando livremente dentro do instrumento por conta de os anéis espaçadores serem instalados soltos. Assim, segundo Silveira (2006), o problema foi corrigido na instrumentação da BEFC Itá, em 1999, onde se tomou o cuidado de soldar os anéis espaçadores à tubulação-guia, verificando-se bom desempenho para distâncias de até 150m.

### *2.3.2.3 Inclinômetros*

De acordo com Silveira (2006), inclinômetros consistem em tubos-guia, instalados na vertical e firmemente presos a um referencial fixo, nos quais são feitas leituras de deslocamento angular em intervalos espaçados, utilizando-se de torpedos dotados de pêndulo interno e que são à prova d'água. A leitura, de acordo com USACE (2020) é feita descendo-se o torpedo até o fim do tubo e subindo-o lentamente, registrando-se os deslocamentos no sentido montante-

jusante e esquerda-direita a cada 60cm, dependendo do padrão adotado. A Figura 10 apresenta um esquema de instalação destes dispositivos, onde é possível ver o torpedo de leituras, a central de aquisição de dados e a ancoragem com graute.



Fonte: Adaptado de USACE (2020)

De acordo com Cruz *et al.* (2014), o tubo do inclinômetro pode ser instalado permanentemente em um furo aberto e que atravesse as zonas que são suspeitas de movimentação ou dentro do enrocamento.

Segundo USACE (2020), a melhor prática é a de se usar sempre o mesmo torpedo na realização das leituras, pois, desvios significantes podem ser observados por uso de torpedos diferentes. Além disso, USACE (2020) ressalta a importância de se fazer correção da posição do tubo caso o mesmo não seja instalado em referência fixa, utilizando-se de topografia.

## 2.4 DEFINIÇÃO DE VALORES DE CONTROLE PARA INSTRUMENTAÇÃO

Conforme exposto por Eletrobrás (2003), é de responsabilidade do projetista, antes do enchimento do reservatório, apresentar os valores de controle para a instrumentação num documento chamado de Manual de Supervisão e Acompanhamento do Comportamento das Estruturas Civas, onde também constarão os procedimentos de segurança para as fases de enchimento do reservatório e operação. Segundo a Eletrobrás (2003), podem ser usados critérios de projeto, modelos matemáticos e modelos reduzidos na determinação dos valores de controle dos instrumentos, no entanto, estes valores geralmente mostram-se exagerados para a fase de operação e devem ser revistos ao longo dos anos.

De acordo com Fusaro (2007), a análise da segurança de barragens de grande porte não deve ser feita apenas com os dados da instrumentação, mas também com inspeções visuais, modelos de comportamento e expertise adquirida com obras similares. Além disso, ainda segundo Fusaro (2007), é muito importante que os dados da instrumentação sejam avaliados assim que coletados e para que as análises sejam rápidas e eficientes deverão existir faixas de aceitação para os valores lidos, que podem ser estabelecidas por métodos determinísticos, estatísticos ou híbridos (que combinam ambos os métodos).

Durante a fase de operação, segundo Eletrobrás (2003), o ideal é utilizar os dados medidos pelos próprios instrumentos para aferir os valores de controle, revisando os mesmos em intervalos regulares de tempo ou sempre que ocorrerem fenômenos de fluência ou eventos inesperados.

### 2.4.1 Métodos determinísticos

De acordo com Menga *et al.* (1999, *apud* FUSARO, 2007), modelos determinísticos nada mais são que modelos de análise estrutural, que sofrem calibração após as medidas tomadas em campo de grandezas que estão sob análise. Os resultados dessas análises, segundo Fusaro (2007), são relações matemáticas que determinam variações causa-efeito.

Os modelos usados, segundo Fusaro (2007), normalmente são baseados no método dos elementos finitos, com formulações bi ou tridimensionais, calibrados por dados coletados pela instrumentação. A autora afirma que, dados de cargas piezométricas, níveis d'água e recalques obtidos nos modelos são confrontados com valores de instrumentação, até se obter o ajuste adequado. Após a calibração, podem ser obtidos valores-limite para as grandezas avaliadas, isto

é, medidas que podem ser observadas em campo que indicariam um coeficiente de segurança abaixo do coeficiente de segurança de projeto.

Algumas restrições são apresentadas por Fusaro (2007) para o uso de métodos determinísticos, a saber:

- Em barragens de terra/enrocamento, os limites obtidos indicam possibilidade de ruptura por escorregamento e não conseguem avaliar mecanismos como *piping* ou recalques excessivos de fundação;
- As análises geralmente não levam em conta a variabilidade nos parâmetros geotécnicos;
- Existem muitas diferenças entre valores de projeto e medidos em campo;
- Por mais bem calibrados que os modelos sejam, é muito difícil que consigam representar com perfeição todas as medidas e especificidades.

No entanto, cabe salientar que, conforme abordado por Fusaro (2007), as variabilidades decorrem de incertezas do modelo (simplificações necessárias), variabilidade estatística dos métodos de amostragem e dos processos de investigação geotécnica e da variabilidade física dos materiais. Segundo a autora, mesmo que fossem conhecidos todos os parâmetros e propriedades dos materiais, seria impossível retratar com perfeição a realidade no modelo numérico.

Por fim, apesar das restrições, Fusaro (2007) salienta que as informações obtidas no modelo são importantes para avaliar e controlar a estrutura ao longo do tempo, pois permitem verificar o comportamento frente às premissas, concepção e objetivo do projetista.

#### 2.4.2 Métodos estatísticos

De acordo com Fusaro (2007), os métodos estatísticos empregados na análise de instrumentação não envolvem na prática a aplicação de estatística sobre os parâmetros geotécnicos, apesar de isso ser possível e os *softwares* permitirem. Segundo Fusaro (2007), o que se faz é aplicar técnicas estatísticas como séries temporais e regressão sobre os dados de instrumentação.

Conforme exposto por Menga *et al.* (1999, apud FUSARO, 2007), as seguintes técnicas estatísticas são empregadas:

- Diagramas de dispersão;
- Regressão linear simples ou múltipla;
- Regressão polinomial;
- Decomposição em séries de Fourier;
- Séries temporais;
- Médias móveis;

- Modelos tipo máximo-mínimo, em intervalos pré-fixados.

Na prática, segundo Fusaro (2007), cada empreendedor define os valores de controle de uma forma, seguindo métodos próprios, combinando análises de estabilidade com determinações estatísticas. Os relatos apresentados por Fusaro (2007) mostram que a Companhia Energética de São Paulo (CESP) e Furnas Centrais Elétricas S.A. adotam práticas estatísticas (modelos de regressão), sendo que a CESP adota três valores de referência: normal, alerta e emergência. Por outro lado, ainda segundo Fusaro (2007), a CEMIG Geração e Transmissão S.A. adota práticas determinísticas, isto é, em estruturas de terra varia-se o nível freático no modelo em elementos finitos até se atingir fatores de segurança de 1,2 e 1,5, que definem o limite de alerta e emergência, respectivamente. Estes limites, conforme exposto por Fusaro (2007) definem processos importantes dentro da Segurança de Barragens, pois, quando um instrumento ultrapassa o nível de atenção, a depender da situação e do instrumento, pode haver uma mudança na frequência de leituras e inspeções, bem como outras análises para averiguar o que ocasionou a mudança de comportamento observada.

Além dos métodos estatísticos reconhecidos, de acordo com Fusaro (2007), as RNA têm obtido sucesso na previsão de leituras de instrumentação de barragens. A principal diferença dos métodos estatísticos e das RNA, segundo Fusaro (2007), é que as RNA não estabelecem hipóteses ou suposições sobre propriedades ou distribuição dos dados, e assim, tendem a ser úteis em situações práticas.

## 2.5 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

De acordo com Haykin (1999) de modo geral, uma RNA pode ser definida como sendo uma máquina projetada para modelar a forma como o cérebro humano faz uma determinada atividade ou executa uma função de interesse. Outra definição é apresentada por Silva, Spatti e Flauzino (2010), que descrevem RNAs como modelos computacionais inspirados no cérebro humano, capazes de aprender e manter conhecimento. Ainda segundo Haykin (1999), as RNAs lembram o cérebro humano em dois aspectos:

- Conhecimento é adquirido pela RNA a partir de seu meio, através de um processo de aprendizado;
- A força de interconexão dos neurônios, nas RNA chamadas de pesos sinápticos, é utilizada para armazenar o conhecimento adquirido.

Para Silva, Spatti e Flauzino (2010), as características mais atrativas das RNAs consistem em sua alta capacidade de mapear sistemas não-lineares, aprendendo comportamentos a partir de informações obtidas, tais como padrões, amostras ou medições. Além disso, Silva, Spatti e Flauzino (2010) comentam a capacidade das RNAs aprenderem com dados existentes, o que permite, após o treinamento da rede, estimar soluções até então desconhecidas (generalização de soluções).

As aplicações dentro da engenharia e ciências são diversas. A seguir, são apresentadas algumas dessas aplicações, mencionadas no trabalho de Silva, Spatti e Flauzino (2010):

- Aproximação universal de funções: é possível mapear relacionamentos entre variáveis reais a partir de um conjunto de dados conhecidos, o que permite mapear processos cuja modelagem por técnicas convencionais é muito complexa;
- Reconhecimento de padrões: é possível associar uma amostra de entrada com classes previamente definidas, permitindo reconhecer, por exemplo, imagens, vozes e escrita;
- Sistemas de previsão: é possível estimar valores futuros de um processo considerando-se medidas já conhecidas, isto envolve atividades como previsão de séries temporais, previsões climáticas, etc.

Dessa forma, as seções seguintes apresentam a analogia entre o neurônio biológico (humano) e o neurônio artificial (da RNA), as arquiteturas de RNA mais comuns, exemplos de aplicação em dados de instrumentação geotécnica, bem como a arquitetura de RNA a ser adotada neste trabalho.

### **2.5.1 Analogia entre o cérebro humano e a Rede Neural Artificial**

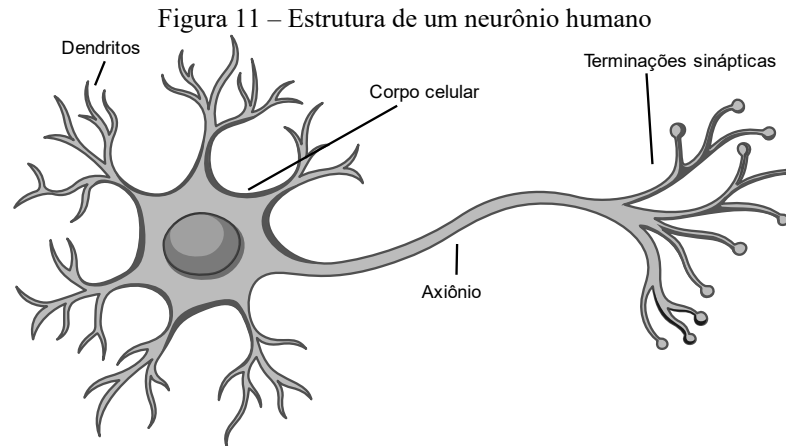
No que concerne ao funcionamento do cérebro humano, Silva, Spatti e Flauzino (2010) salientam que o neurônio é a principal célula do sistema nervoso cerebral e seu papel pode ser resumido como conduzir impulsos elétricos em determinadas condições, sendo as conexões chamadas de sinapses. Quanto às partes de um neurônio, Silva, Spatti e Flauzino (2010) comentam que o neurônio humano pode ser dividido da seguinte maneira:

- Dendritos: Têm função de captar estímulos de outros neurônios ou do meio externo em que se encontram;
- Corpo celular: têm por função realizar o processamento dos estímulos recebidos dos dendritos e produzir um potencial de ativação, passando a informação para o axônio;



- Axiônios: têm por função receber os impulsos elétricos do corpo celular e passar estes impulsos a outros neurônios ou ao tecido muscular.

A Figura 11 apresenta a estrutura típica de um neurônio humano, de forma simplificada.



Fonte: Adaptado de Silva, Spatti e Flauzino (2010)

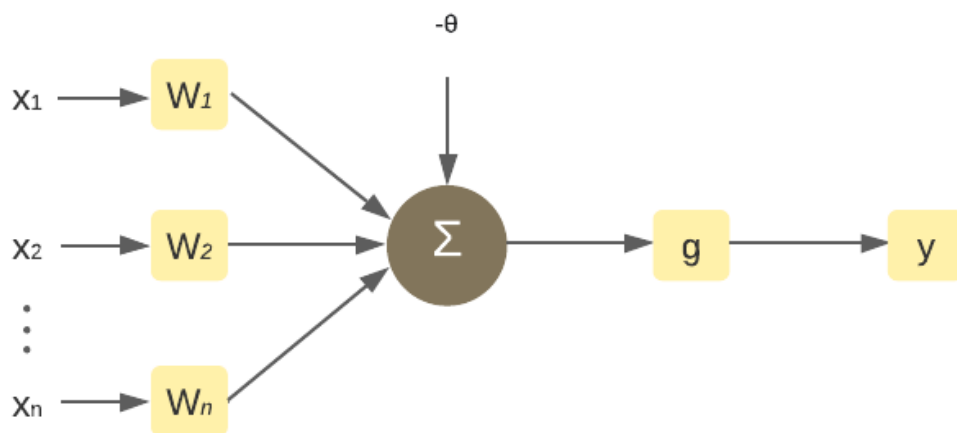
Para Kim e Kim (2008), em virtude de as RNAs aprenderem com dados reais, é possível tecer uma analogia com o cérebro humano, conforme previamente relatado, pois, o ser humano também aprende com exemplos. Conforme exposto por Silva, Spatti e Flauzino (2010), os neurônios artificiais costumam fornecer saídas contínuas, realizando funções simples, como pegar dados de entrada, agregá-los e produzir uma resposta. Existem diversos modelos de estrutura neural artificial, no entanto, o mais simples deles, segundo Silva, Spatti e Flauzino (2010) pode ter suas atividades descritas nas seguintes etapas:

- Sinais de entrada ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ): cada neurônio da rede recebe um conjunto de informações (dados), o que é análogo aos impulsos externos captados pelos dendritos do cérebro humano;
- Pesos sinápticos ( $W_1, W_2, \dots, W_n$ ): as operações de sinapse feitas pelo neurônio humano são feitas através de pesos sinápticos no neurônio artificial (vetor de constantes). Cada informação do meio externo sofre uma ponderação;
- Combinador linear ( $\Sigma$ ): todos os sinais, após a ponderação são agregados, para produzir um potencial de ativação (como no corpo celular do cérebro humano);
- Limiar de ativação ( $\theta$ ): variável responsável por especificar o patamar apropriado para que o valor produzido na etapa do combinador linear possa gerar um valor de disparo para a saída do neurônio;
- Potencial de ativação ( $u$ ): resultado da diferença entre o valor do combinador linear e o limiar de ativação;
- Função de ativação ( $g$ ): têm por função limitar a saída do neurônio para um intervalo de valores razoáveis;

- Sinal de saída ( $y$ ): é o valor final, produzido pelo neurônio artificial, com base nos dados de entrada. Podem ser os dados de entrada de outros neurônios (similarmente ao axônio do neurônio humano);

A Figura 12 apresenta a estrutura típica de um neurônio artificial, onde é possível identificar cada um dos componentes supracitados.

Figura 12 – Estrutura do neurônio artificial



Fonte: Adaptado de Silva, Spatti e Flauzino (2010)

Segundo Kim e Kim (2008), a grande capacidade das RNAs em resolver problemas de elevada complexidade as credencia como uma boa alternativa para resolver problemas de engenharia. Por conta da alta complexidade intrínseca aos problemas geotécnicos, muitos destes podem ser resolvidos de forma prática e até mesmo simples, utilizando algoritmos de inteligência artificial.

### 2.5.2 Arquiteturas de Redes Neurais Artificiais

A maneira como os neurônios são conectados está relacionada ao algoritmo de aprendizado usado no treinamento, e a forma dessa ligação, segundo Haykin (1999), é chamada de arquitetura da rede. Cada arquitetura pode possuir estruturas diferentes, isto é, os neurônios podem estar ligados de diferentes maneiras, e essa formação é o que se denomina topologia da rede. Independentemente da arquitetura, toda RNA, de acordo com Silva, Spatti e Flauzino (2010), terá uma camada de entrada (responsável por tratar os dados de entrada), uma camada

intermediária (responsável pelo processamento dos dados) e uma camada de saída (responsável pela apresentação dos dados de resposta).

As principais arquiteturas de RNA, segundo Silva, Spatti e Flauzino (2010), são:

- Arquitetura *feedforward* (alimentada à frente) de camadas simples: usadas em problemas de classificação de padrões e filtragem linear, essa arquitetura faz com que a informação sempre siga um fluxo de direção única, isto é, da camada de entrada para a de saída. Assim, a quantidade de saídas está ligada sempre ao número de neurônios. São exemplos as redes *Perceptron* e *Adaline*;
- Arquitetura *feedforward* (alimentada à frente) de camadas múltiplas: usadas em problemas de aproximação de funções, classificação de padrões, identificação de sistemas, otimização, robótica e ao controle de processos. Nessa arquitetura, ocorrem pelo menos duas camadas neurais ditas escondidas, que são aquelas além das de entrada e saída. São exemplos as redes *Perceptron* multicamadas e as redes de base radial;
- Redes recorrentes: usadas em sistemas com variação ao longo do tempo, tal como a previsão de séries temporais, otimização e identificação de sistemas. São RNAs cuja camada de saída serve como camada de entrada de outros neurônios;
- Redes reticuladas: usadas em problemas de agrupamento, reconhecimento de padrões, otimização de sistemas e grafos. São RNAs cujos dados são dispostos espacialmente.

Há de se mencionar que, conforme abordado por Haykin (1999), a principal tarefa de uma RNA, independente da arquitetura, é aprender um modelo real a partir de informações do mundo real. Ainda segundo Haykin (1999), para que a RNA possa aprender, ela precisa dispor do conhecimento sobre o estado real do mundo em que estará trabalhando e medidas desse mundo, que são obtidas de instrumentos e sensores que investigam determinada estrutura ou sistema.

Conforme descrito na seção 1.1, é de particular interesse verificar a aplicabilidade das RNAs na avaliação de deslocamentos em barragens de enrocamento, não sendo escopo deste trabalho explicar em detalhes o funcionamento de cada uma das arquiteturas de RNAs. Dessa forma, a seção 2.5.3 apresenta uma revisão sobre o uso de RNAs em barragens, de modo a balizar a escolha da arquitetura que mais se adeque ao problema em questão.

### 2.5.3 Aplicações das Redes Neurais Artificiais em barragens

O trabalho de Wu *et al.* (2014) utilizou dados de deslocamento da barragem de Nuozhadu, na China, através de um método inteligente de retroanálise, que utilizou RNAs no

lugar de análises por elementos finitos para reavaliar os parâmetros geotécnicos da barragem. Segundo Wu *et al.* (2014) análises convencionais por elementos finitos nesse tipo de situação têm tempo de computação elevado e facilmente caem em problemas de mínimos locais. Assim, foi treinada uma RNA utilizando como entrada os dados de deslocamento extraídos de uma análise por elementos finitos feita com o modelo de Duncan e Chang e como saída esperada os parâmetros geotécnicos que foram usados no modelo. Após o treinamento, foram fornecidos os deslocamentos reais para a rede já treinada e obtidos os parâmetros geotécnicos do maciço. Os novos dados permitiram rodar novas análises no modelo de elementos finitos, que mostrou boa aderência entre os deslocamentos reais (medidos) e os deslocamentos fornecidos pelo modelo após a calibração.

Por outro lado, o trabalho de Tayfur *et al.* (2005) comparou a determinação de leituras piezométricas de um modelo em elementos finitos e de um algoritmo de RNAs a diferentes níveis do reservatório na barragem de Jeziorsko, na Polônia. Ambos os modelos foram calibrados com dados piezométricos reais. O resultado mostrou que as RNAs puderam prever as leituras dos piezômetros apenas com a informação do nível do reservatório, com tanta precisão quanto o modelo de elementos finitos, e em alguns casos com menos erros, visto que a RNA é capaz de abstrair situações físicas intrínsecas aos dados que não temos capacidade de prever ou modelar. A arquitetura utilizada por Tayfur *et al.* (2005) foi a de RNAs *feedforward* de múltiplas camadas.

Outro trabalho que utilizou RNAs foi o de Gourine e Khelifa (2018). Gourine e Khelifa (2018) combinaram o modelo de deslocamentos francês *Hydrostatic, Seasonal, Time* (HST) em conjunto com RNAs e análises de espectro único, utilizando os dados da barragem de Schlegeis na Áustria. Os autores compararam os modelos de RNAs com a consagrada regressão linear, percebendo que a regressão apresentou correlação de aproximadamente 80%, enquanto que, as RNAs foram capazes de encontrar até 99% de correlação entre os dados de saída e os dados observacionais. Os autores concluem que os resultados foram promissores e que os métodos empregados podem ser uma ferramenta poderosa de tomada de decisões relacionadas à segurança de barragens.

No contexto do presente estudo, o trabalho de Han *et al.* (2020) realizou uma análise das deformações horizontais de BEFCs utilizando RNAs para prever os deslocamentos. O supracitado modelo HST é utilizado como justificativa para a escolha dos parâmetros de treinamento da rede. O estudo conduzido por Han *et al.* (2020) considerou a temperatura no interior do enrocamento, o tempo em dias e os níveis do reservatório em diferentes graus

polinomiais (grau 1, 2 e 3) como parâmetros de treinamento. Para a aproximação da função, foram usados modelos de base radial, com 16 neurônios na camada escondida. Os resultados mostram que houve uma boa aproximação entre o modelo de base radial e os dados medidos.

Kim e Kim (2008) montaram um modelo de RNAs para prever recalques da crista de barragens de enrocamento com face de concreto. Após algumas análises, os autores resolveram considerar a altura da barragem, o índice de vazios do enrocamento e o módulo de deformabilidade vertical após a construção das barragens como dados de entrada. No estudo de Kim e Kim (2008) foram consideradas 30 barragens de todo o mundo. As conclusões foram que os modelos previram com eficiência as leituras observadas em campo, mostrando que há potencial aplicação das RNAs para uso geral em barragens de enrocamento. Além disso, os autores frisam que o uso dos parâmetros considerados foi suficiente para descrever de forma precisa os deslocamentos na crista das barragens.

Os trabalhos existentes que avaliaram a aplicação de RNAs como ferramenta de predição de deslocamentos e piezometria em barragens em sua grande maioria utilizaram RNAs com múltiplas camadas, do tipo *Perceptron* de múltiplas camadas ou redes de base radial. Dessa forma, tendo em vista os excelentes resultados apresentados por essas arquiteturas, optou-se pela utilização das RNAs multicamadas do tipo *Perceptron*. A seção seguinte explica em detalhes o funcionamento do algoritmo de uma RNA do tipo *Perceptron* multicamadas.

#### **2.5.4 A arquitetura da rede *Perceptron* de múltiplas camadas**

Redes do tipo *feedforward* Perceptron de múltiplas camadas (PMC) são, segundo Haykin (1999), nada mais que uma série de nós que constituem uma camada de entrada, uma ou mais camadas escondidas ou intermediárias e uma camada de saída. As entradas, conforme expõe Haykin (1999) se propagam através da rede, passando camada por camada, no sentido da entrada para a saída.

As redes PMC se credenciam para resolver alguns problemas complexos e diversos, e para Haykin (1999), apresentam bom desempenho quando são treinadas usando um algoritmo conhecido como *back-propagation*. Na prática, Haykin (1999) explica que o algoritmo de *back-propagation* faz com que parâmetros que geram respostas conhecidas entrem na rede, e então, os pesos sinápticos são mantidos fixos, obtendo-se uma saída através de operações matemáticas simples. A partir da saída obtida, verifica-se o erro em relação ao que se esperava obter para os respectivos valores dos parâmetros de entrada e, de forma reversa, os pesos são ajustados.

Normalmente, conforme abordado por Haykin (1999), há uma meta de erro a ser atingida, que é representada pela diferença entre a saída calculada e a saída obtida da rede, chamada de sinal de erro. O sinal de erro é passado de forma reversa na rede (da saída para a entrada), e é o ajuste iterativo dos pesos que faz com que haja uma resposta mais próxima à realidade possa ser obtida.

O ajuste dos pesos sinápticos, segundo Silva, Spatti e Flauzino (2010) é feito através do que se denomina treinamento supervisionado, ou seja, para cada amostra de entrada, obtém-se a respectiva saída desejada a partir de um conjunto de dados conhecidos. Nesse processo, cada saída dos neurônios de uma camada, seja ela intermediária ou a primeira camada, passa por uma função de ativação. Conforme exposto por Haykin (1999), a função de ativação ( $g$ ) tem por função limitar a amplitude de saída dos neurônios em uma faixa de valores finitos. Na prática, os dados de entrada também precisam ser normalizados para a faixa de saída destas funções. De acordo com Silva, Spatti e Flauzino (2010), existem funções de ativação parcialmente diferenciáveis e funções totalmente diferenciáveis.

#### 2.5.4.1 Funções de ativação

Existem diversas funções que podem ser utilizadas como funções de ativação nas RNAs. Para o caso das redes PMC, Haykin (1999) salienta que cada neurônio deve possuir uma função de ativação não linear que seja uma curva suave do ponto de vista matemático, isto é, contínua e diferenciável em qualquer ponto. Neste caso, são funções não-lineares tipicamente empregadas: a função logística, a função tangente hiperbólica e a função linear.

A função logística, segundo Silva, Spatti e Flauzino (2010) assume sempre valores reais entre zero e um. Matematicamente, é definida pela Equação 02, em que  $\beta$  é uma constante real associada ao nível de inclinação da função frente ao seu ponto de inflexão, e  $u$  é o parâmetro de entrada. Segundo Haykin (1999), esta é a função de ativação mais comum na construção de RNAs do tipo PMC.

$$g(u) = \frac{1}{1 + e^{-\beta \cdot u}} \quad (2)$$

Outra função de ativação bastante comum é a tangente hiperbólica. Segundo Silva, Spatti e Flauzino (2010), essa função assume valores entre  $-1$  e  $1$  e é definida pela expressão

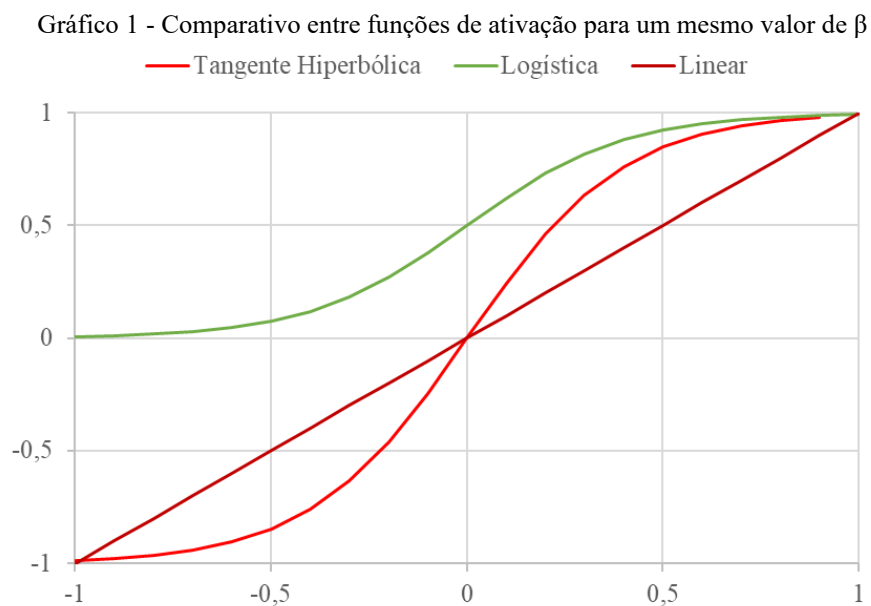
apresentada na Equação 03, onde nota-se a presença do parâmetro  $\beta$ , também associado à inclinação da função em relação ao seu ponto de inflexão.

$$g(u) = \frac{1 - e^{-\beta \cdot u}}{1 + e^{-\beta \cdot u}} \quad (3)$$

Tanto a função logística, quanto a função tangente hiperbólica, segundo Haykin (1999), pertencem à família de funções sigmoidais.

Por fim, uma função muito utilizada no mapeamento de comportamentos, segundo Silva, Spatti e Flauzino (2010) é a função linear. Nessa função, não há transformação, e o dado de entrada é sua própria saída, ou seja,  $g(u)$  é o próprio  $u$ . Uma variação dessa função é a função retificada linear, cujo comportamento é idêntico ao da função linear, porém, seu domínio é composto apenas por números positivos.

Um comparativo entre as funções de ativação linear, logística e tangente hiperbólica, para um valor fixo do parâmetro  $\beta$  é apresentado no Gráfico 1.



Fonte: do Autor (2021)

#### 2.5.4.2 Número de camada e neurônios

O número de camadas em uma rede MLP pode ser tão grande quanto necessário. No entanto, o trabalho de Hornik *et al.* (1989) provou que uma rede neural com três camadas com as funções de ativação adequadas e um bom número de neurônios na camada escondida é suficiente para aproximar qualquer relação não-linear. Haykin (1999), ao se referir ao abordado por Hornik *et al.* (1989), salienta que tal descoberta não conclui que apenas uma camada escondida garante o melhor tempo de aprendizado, facilidade de implementação ou uma melhor generalização, de modo a justificar a necessidade de testes com diferentes configurações.

Já o número de neurônios, conforme abordado por Ghodrati e Araei (2017), normalmente é definido por tentativa e erro. Outros trabalhos que comentam o mesmo de Ghodrati e Araei (2017) são os de Tayfur *et al.* (2005) e o de Han *et al.* (2020), onde o número de neurônios na camada escondida também foi definido através de tentativa e erro. No entanto, outras abordagens podem ser adotadas, conforme proposto por Pham *et al.* (2020), onde foram utilizados algoritmos genéticos, que são algoritmos evolutivos, para definição da topologia de rede neural, mostrando bons resultados.

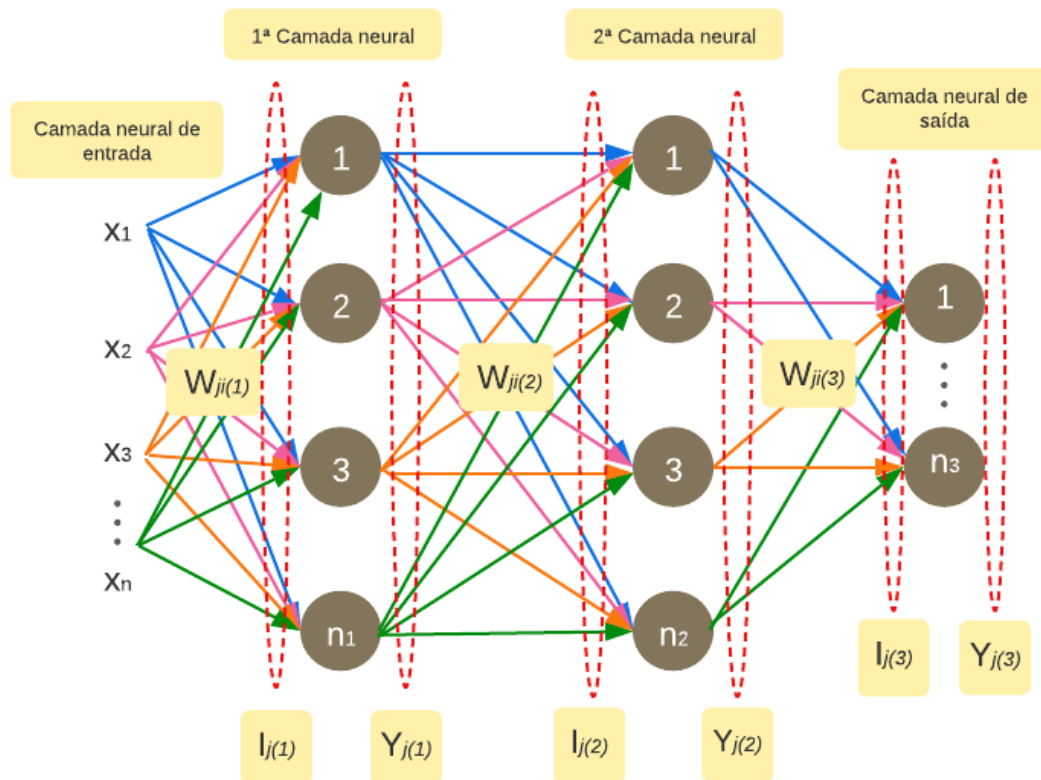
Dessa forma, tanto o número de camadas, quanto o de neurônios pode ser feito por abordagens de tentativa e erro ou pela utilização de algoritmos evolutivos/adaptativos. A escolha dependerá do objetivo do estudo. Caso deseje-se avaliar a aplicabilidade das redes neurais em uma determinada área, pode ser interessante utilizar a abordagem tradicional por tentativa e erro, pois é menos custosa computacionalmente e leva menos tempo para a implementação.

#### 2.5.4.3 Sequência de treinamento das redes Perceptron de múltiplas camadas

Conforme supracitado, redes do tipo PMC aprendem através do algoritmo de *backpropagation*. A Figura 13 ilustra uma arquitetura típica de uma rede PMC, onde estão elencados os principais elementos constituintes.



Figura 13 – Estrutura de uma rede tipo *Perceptron* de múltiplas camadas



Fonte: Adaptado de Silva, Spatti e Flauzino (2010)

Cada item indicado na Figura 13 possui um significado, que podem ser resumidos, segundo Silva, Spatti e Flauzino (2010), da seguinte maneira:

- $W_{ji}(1,2,3)$ : Correspondem às matrizes de peso sináptico. Essas matrizes são iniciadas aleatoriamente na primeira fase do processo de aprendizado e ajustadas no processo de *backpropagation*. Sua dimensão está associada ao número de neurônios da camada seguinte ( $j$ -ésimo) e da camada anterior ( $i$ -ésimo);
- $I_j(1,2,3)$ : Correspondem às matrizes que são resultado da multiplicação entre a matriz de pesos sinápticos e os vetores de entrada ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ );
- $Y_j(1,2,3)$ : São as matrizes resultantes da aplicação da função de ativação escolhida no modelo. Elas também são os dados de entrada das camadas seguintes, por exemplo, a matriz  $Y_j(1)$  é multiplicada pela matriz  $W_{ji}(2)$  para a obtenção de  $I_j(2)$ , e assim sucessivamente, até a camada de saída.

A primeira etapa do cálculo, conforme exposto no trabalho de Haykin (1999), envolve passar por estes cálculos considerando os valores correntes das variáveis de entrada. Então, conforme supracitado, faz-se uma verificação do erro entre os dados de saída e os dados

conhecidos. A verificação do erro, segundo Silva, Spatti e Flauzino (2010), pode ser feita utilizando-se a função raiz do erro quadrático médio (*Root Mean Square Error* – RMSE), ou ainda, outras funções de avaliação.

Os passos seguintes do treinamento (*backpropagation*) envolvem ajustar a matriz de pesos sinápticos da camada de saída ( $W_{ji(3)}$ ) e os pesos sinápticos das camadas intermediárias. Conforme apresentado por Silva, Spatti e Flauzino (2010), para buscar a minimização do erro, são utilizados artifícios matemáticos como a definição do gradiente e a diferenciação em cadeia para deduzir outras equações responsáveis pelos ajustes dos pesos sinápticos das camadas intermediárias. As equações de ajuste das camadas sinápticas apresentadas pelos autores são indicadas nas Equações 04, 05 e 06 (equações em notação algorítmica), em que o termo  $\delta_j$  corresponde ao gradiente local para cada etapa do processo e pode ser calculado segundo as Equações 07, 08 e 09. Salienta-se que:

- Para a Equação 04, o gradiente local é calculado com a Equação 07;
- Para a Equação 05, o gradiente local é calculado com a Equação 08;
- Para a Equação 06, o gradiente local é calculado com a Equação 09;
- O termo  $g'()$  apresentado nas equações diz respeito à derivada de primeira ordem da função de ativação.

$$W_{ji(3)} \leftarrow W_{ji(3)} + \eta \cdot \delta_{j(3)} \cdot Y_{i(2)} \quad (4)$$

$$W_{ji(2)} \leftarrow W_{ji(2)} + \eta \cdot \delta_{j(2)} \cdot Y_{i(1)} \quad (5)$$

$$W_{ji(1)} \leftarrow W_{ji(1)} + \eta \cdot \delta_{j(1)} \cdot x_i \quad (6)$$

$$\delta_{j(3)} = (d_j - Y_{j(3)}) \cdot g'(I_{j(3)}) \quad (7)$$

$$\delta_{j(2)} = - \left( \sum_{k=1}^{n_3} (\delta_{k(3)} \cdot W_{kj(3)}) \cdot g'(I_{j(2)}) \right) \quad (8)$$

$$\delta_{j(1)} = - \left( \sum_{k=1}^{n_2} (\delta_{k(2)} \cdot W_{kj(2)}) \cdot g'(I_{j(1)}) \right) \quad (9)$$

No presente trabalho, o método de treinamento denominado ADAM (*Adaptive Moment Estimation*) é empregado. Ele consiste em um método de otimização estocástica que necessita apenas gradientes de primeira ordem e pouca memória disponível para rodar. Este método de treinamento é a união de dois outros: O RMSProp (Tieleman e Hinton, 2012) e o

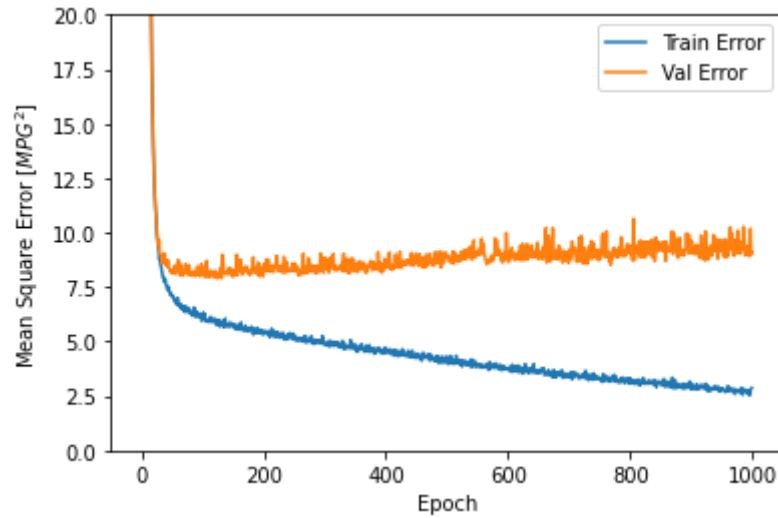
AdaGrad (Duchi *et al*, 2011). Detalhes sobre o algoritmo ADAM e seu funcionamento podem ser vistos em Kingma e Ba (2015).

A aplicação sucessiva destas equações, ou de outras sequências de treinamento, é finalizada ao se atingir um critério de parada pré-estabelecido, por exemplo, um critério de erro máximo aceitável. Além disso, conforme exposto por Silva, Spatti e Flauzino (2010) o termo  $\eta$  corresponde à taxa de aprendizado, definida pelo usuário. Após o treinamento utilizando essa sequência de equações e adotando um erro máximo aceitável de parada, basta utilizar a amostra de dados desejada com as matrizes de pesos sinápticos já ajustadas durante a fase de treinamento para obter as saídas da rede (Haykin, 1999).

#### 2.5.4.4 Avaliação do aprendizado da rede e dos resultados obtidos

Durante o treinamento da rede neural, há o risco de ocorrer um fenômeno denominado de *overfitting*, ou ainda, sobreajuste. Este fenômeno, segundo Ghodrati e Araei (2017) é o processo que ocorre quando o erro da validação começa a aumentar enquanto o erro do treinamento continua a diminuir. Isso indica que a rede está se ajustando excessivamente ao conjunto de treinamento, ou seja, aprendendo o padrão do conjunto de treinamento de modo que não é possível generalizar o resultado obtido com qualidade no conjunto de validação e consequentemente o de testes. O monitoramento dos erros é parte integrante do processo de ajuste da topologia e configuração da rede neural, sendo essencial para a tomada de decisões. O Gráfico 2 foi extraído da documentação da biblioteca Tensorflow e apresenta indicativos de sobreajuste, com a diminuição do erro de treinamento e estagnação do erro de validação. Quando não ocorre sobreajuste, as curvas apresentadas no Gráfico 2 costumam se aproximar.

Gráfico 2 – Avaliação de overfitting



Fonte: Tensorflow Library (2021)

Quando o modelo não apresenta indicativo de sobreajuste, o resultado final da regressão pode ser avaliado por diferentes métricas de performance. Twomey e Smith (1995) salientam que normalmente são usadas três diferentes formas de se medir performance dos modelos: A raiz do erro quadrático médio (RMSE), o erro médio absoluto (MAE) e o percentual de classificação adequada. Em problemas de regressão, os dois primeiros são mais usados, incluindo uma quarta métrica, denominada de erro quadrático médio (MSE). Ainda segundo os autores, não existem consensos de qual a melhor métrica a se usar e comparações com os resultados obtidos por outros pesquisadores pode ser difícil. Dessa forma, cada estudo deve considerar qual destas formas de medir performance é mais aplicável para seu trabalho.

As Equações 10, 11 e 12 apresentam o RMSE, MSE e o MAE. Para cada equação,  $d_j(k)$  representa cada o elemento de valor conhecido,  $Y_j^{(3)}(k)$  representa a saída do cálculo da rede e  $p$  representa o tamanho da amostra.

$$RMSE = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \left( \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^{n_3} (d_j(k) - Y_{j(3)}(k))^2 \right) \quad (10)$$

$$MSE = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \left( \sum_{j=1}^{n_3} (d_j(k) - Y_{j(3)}(k))^2 \right) \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \left( \sum_{j=1}^{n_3} |d_j(k) - Y_{j(3)}(k)| \right) \quad (12)$$

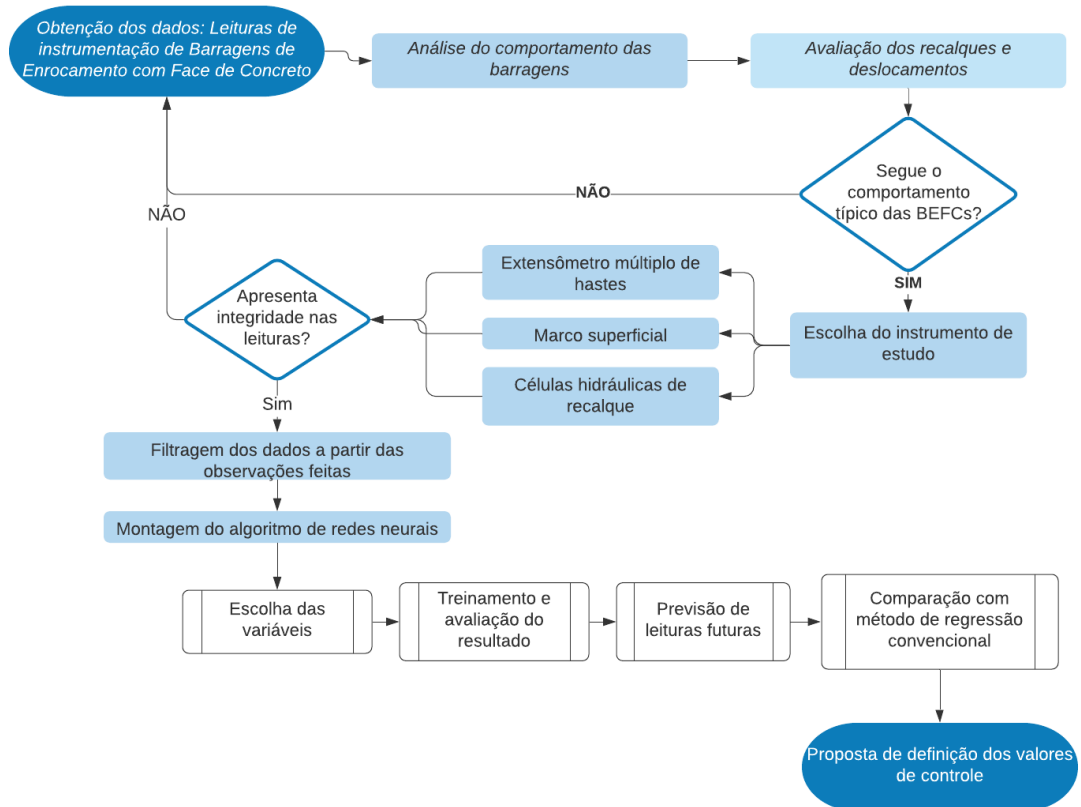
Reforça-se que o objetivo do presente trabalho é aplicar a arquitetura MLP no estudo de deslocamentos em barragens de enrocamento e, se os resultados obtidos forem satisfatórios, estabelecer um método de definição de valores de controle para os instrumentos. O processo descrito neste capítulo visa elucidar a ideia do funcionamento ao leitor, de modo a fornecer-lhe conhecimento suficiente para a compreensão do procedimento. As RNAs não foram discutidas de maneira mais aprofundada, visto que atualmente existem bibliotecas em linguagens de programação de alto nível, como o Python, amplamente testadas e comprovadamente funcionais que estabeleceram métodos de treinamento otimizados o suficiente para emprego nesse tipo de estudo.

Além disso, cabe salientar que se justifica a utilização de algoritmos na situação mencionada, pois, na prática as planilhas de instrumentação vêm sendo substituídas por sistemas complexos, que funcionam *online*, em que tais algoritmos podem ser empregados facilmente.

### 3 MÉTODO

O método deste trabalho baseia-se no fluxograma apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma do método do estudo



Fonte: do Autor (2021)

#### 3.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS BARRAGENS

Para permitir o desenvolvimento deste estudo, foram solicitados dados de projeto e instrumentação para 8 empreendedores<sup>1</sup> nacionais que detêm o direito de geração sobre barragens de terra ou enrocamento. Destes empreendedores, apenas dois sinalizaram positivamente e forneceram seus dados, os demais não responderam. Visando respeitar uma solicitação de ambos os empreendedores, este estudo não apresentará o nome e a localização

<sup>1</sup> Empreendedor: pessoa física ou jurídica que detenha outorga, licença, registro, concessão, autorização ou outro ato que lhe confira direito de operação da barragem e do respectivo reservatório, ou, subsidiariamente, aquele com direito real sobre as terras onde a barragem se localize, se não houver quem os explore oficialmente (BRASIL, 2020)

das usinas e as plantas e seções transversais foram criadas pelo próprio autor de modo a descaracterizar os empreendimentos. Além disso, a numeração dos instrumentos foi trocada e as datas de início das leituras foram normalizadas para a data de 01/01/1970. Preservaram-se apenas os dados numéricos, sendo que as cotas topográficas foram subtraídas do ponto mais baixo do desenho (que passará a ser o marco zero), de modo a retirar qualquer indicação de nível que possa caracterizar a altitude do barramento em relação ao nível do mar.

As estruturas são brevemente descritas na seção 3.1.1 e dados obtidos foram analisados frente ao comportamento esperado de cada uma das barragens, tomando como base o disposto na seção 2.2.1.1. As observações acerca do comportamento das estruturas são apresentadas nas seções 4.1.1 a 4.1.3.

### 3.1.1 Apresentação dos empreendimentos

Foram obtidos dados de instrumentação de duas BEFCs, uma com altura superior a 100m e outra com altura superior a 50m. Para fins de padronização e organização a barragem com altura superior a 100m foi chamada de Barragem A e a outra chamada de Barragem B. A Tabela 2 apresenta a lista de instrumentos que fazem a medição de deslocamentos instalados em cada um dos empreendimentos. Ressalta-se que os marcos de referência não são instrumentos onde se tomam leituras, mas sim, dispositivos de suporte à instalação de estações topográficas para a realização das campanhas nos marcos superficiais.

Tabela 2 - Quantitativo de instrumentos instalados

<b>Barragem A</b>		<b>Barragem B</b>	
<b>Instrumento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Quantidade</b>
Marco superficial	24	Marco superficial	15
Marcos de referência	10	Marcos de referência	6
Caixa sueca	23	Caixa sueca	13
Extensômetro KM (horizontal)	8	Extensômetro KM (horizontal)	3

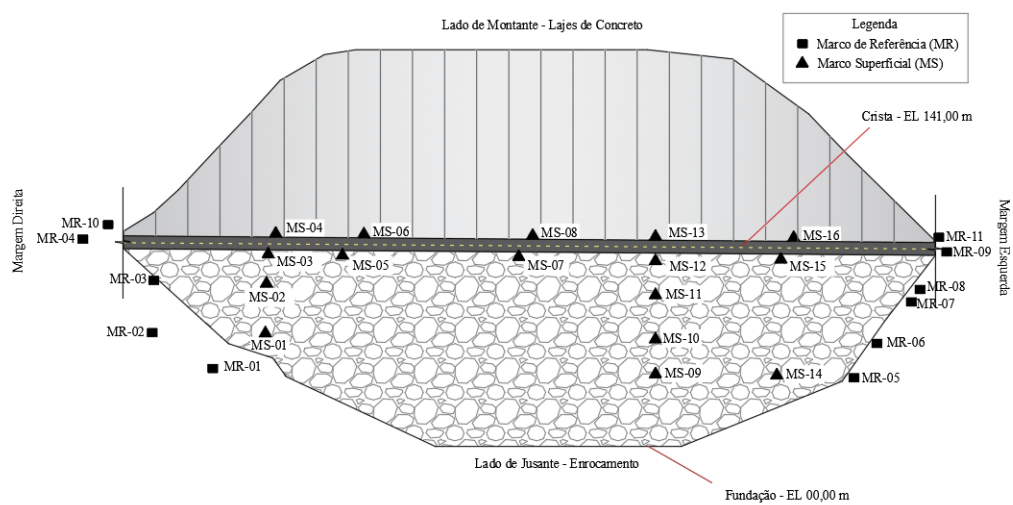
Fonte: do Autor (2021)

Em virtude da idade de uma das barragens, alguns instrumentos encontram-se danificados, especialmente as células de recalque (caixa sueca) e os extensômetros de haste. Dessa forma, os marcos superficiais são os que permanecem com a maioria operante. A frequência de leitura dos marcos para ambas as usinas era diária durante o período construtivo.

Após o início da operação, a frequência passou a ser quinzenal na Barragem A e trimestral na Barragem B.

A Figura 15 apresenta a localização dos marcos superficiais e marcos de referência da Barragem A. Os marcos do MS-17 ao MS-24 não estão locados, pois, encontram-se danificados e o empreendedor não disponibilizou seus históricos de leituras.

Figura 15 – Localização dos marcos superficiais, Barragem A, vista superior.

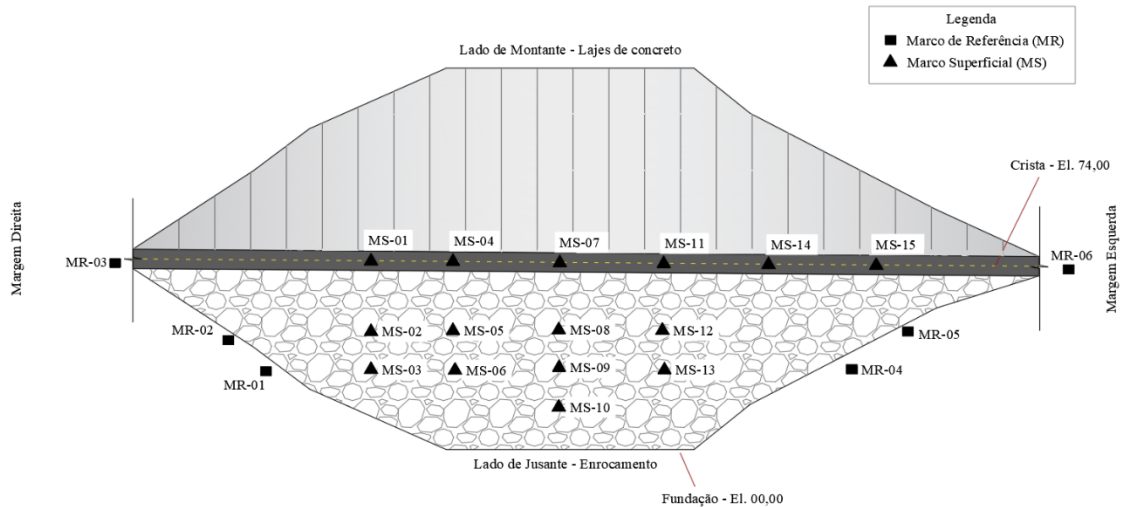


Fonte: Desenhos de locação fornecidos pelo empreendedor. Elaboração: do Autor (2021)

A locação dos marcos superficiais e marcos de referência da Barragem B é apresentada na Figura 16. Nessa estrutura, nenhum instrumento encontra-se danificado até o presente momento.



Figura 16 - Localização dos marcos superficiais, Barragem B, vista superior.



Fonte: Desenhos de localização fornecidos pelo empreendedor. Elaboração: do Autor (2021)

Os dados disponibilizados para ambas as usinas totalizaram 14.962 leituras, sendo 10.064 medições de recalque e deslocamento na Barragem A, uma média de 629 leituras por marco superficial. Na barragem B foram disponibilizadas 4.898 medições, totalizando uma média de 326 leituras por marco superficial.

### 3.2 ESCOLHA DO INSTRUMENTO DE ESTUDO

Conforme exposto na seção 3.1, os instrumentos disponíveis para estudo dos deslocamentos em ambas as barragens eram células de recalque, extensômetros de haste e marcos superficiais. As células de recalque e os extensômetros foram descartados pois alguns encontram-se danificados em uma das barragens. Dessa forma, dentre as opções de instrumento para análise dos deslocamentos, optou-se pelo marco superficial, pois, são instrumentos de longa vida útil, que raramente são danificados e que se apresentam operantes em ambas as barragens de estudo.

### 3.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS BARRAGENS

Conforme abordado por Cruz *et al.* (2014) e já comentado neste trabalho, a análise do comportamento de BEFCs deve ser feita primariamente em relação às vazões e em conjunto com a análise de deslocamentos e deformações. Neste caso, a análise dos deslocamentos verticais e horizontais pode ser feita com diversos instrumentos e envolve uma análise geral de

comportamento da estrutura. Para as barragens do presente trabalho as análises em relação aos deslocamentos medidos pelos marcos superficiais são conduzidas no Capítulo 4.

### 3.4 PREVISÃO DE LEITURAS DE DESLOCAMENTO COM REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

O primeiro passo para a montagem da RNA reside na escolha das variáveis que devem ser consideradas na predição dos dados de deslocamento superficial. O modelo HST, mencionado na seção 2.5.3, diz que os deslocamentos horizontais estão associados à variação de temperatura no enrocamento (sazonalidade), à pressão exercida pelo reservatório (empuxo hidrostático) e à fluência que ocorre com o enrocamento (deformação ao longo do tempo). Assim, para ambas as barragens se têm que:

- A temperatura no enrocamento não foi medida para nenhuma das barragens, e, portanto, não pode ser considerada diretamente. Na Barragem A, é monitorada a temperatura diária (ambiente) desde o início operação, e os dados foram utilizados. Na Barragem B, não foram disponibilizados dados de temperatura, assim, foram tomados dados da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mais próxima;
- A pressão exercida pelo reservatório é diretamente relacionada ao seu nível, assim, as leituras do nível do reservatório devem ser suficientes para quantificar esta grandeza. Na Barragem B, não foram disponibilizados níveis do reservatório para todos os dias da operação, o que inviabiliza a consideração nas análises;
- A fluência é a grandeza mais difícil de se obter. Assim, como ela ocorre com o passar do tempo, a variável tempo (dias) foi considerada como parâmetro relacionado à fluência.

Quanto aos recalques, sabe-se que os mesmos dependem de características intrínsecas ao barramento, como a forma do vale (que também influencia os deslocamentos horizontais), a altura do empreendimento, os módulos de deformabilidade do enrocamento e da fundação, as condições de compactação durante a construção, a fluência e os ciclos de molhagem do enrocamento, por exemplo. Algumas destas grandezas são de difícil quantificação, dificultando ou impossibilitando sua inclusão num modelo de RNAs. A grandeza mais fácil de se considerar é a altura do barramento, representada neste trabalho pelo ponto de instalação do instrumento.

### 3.4.1 Montagem da Rede Neural

Após a escolha das variáveis, os arquivos foram organizados em uma planilha eletrônica, com a estrutura conforme apresentada na Tabela 3, para ambas as Barragens. Conforme supracitado, para a Barragem B, no entanto, não foram disponibilizados dados de nível do reservatório em medições suficientes e a coluna foi desconsiderada, o que impediu a união dos conjuntos de dados de ambas as barragens e impossibilitou a concepção de um modelo que tentasse englobar ambas as estruturas. A coluna “dias” representa o tempo passado desde o dia fictício de início das leituras, 01/01/1970.

Cabe salientar que, todas as observações feitas nessa seção sobre a definição do modelo dizem respeito a princípio aos dados da Barragem A, que, por ter maior completude de dados, serviu de parâmetro-base durante a realização do estudo. Porém, muitas delas podem ser estendidas também para a Barragem B.

Tabela 3 – Estrutura da planilha eletrônica utilizada

INSTRUMENTO	DIAS	RECALQUE	DESLOCAMENTO	NÍVEL RESERVATÓRIO	ALTURA FUNDACAO	TEMPERATURA
MS1	0	0	0	0	85	21,05
MS1	27	-0,9	1,7	128,5	85	25
MS1	28	-1	1,7	128,8	85	23,8
MS1	29	-1	1,7	129,1	85	24,6
MS1	31	-1,3	2	129,62	85	24,5
MS1	32	-1,1	2,2	130,2	85	24,1
MS1	33	-1,1	2,2	130,9	85	24
MS1	34	-1,3	2,5	131,4	85	25,1
MS1	35	-1,2	2,5	132,07	85	25,5
MS1	36	-1,3	2,5	132,5	85	21,5
MS1	38	-1,4	2,5	133,43	85	24,6
...	...	...	...	...	...	...
MS13	9056	-58,6	37,8	137,57	138,74	33,7
MS13	9065	-58,6	37,8	137,54	138,74	29,9
MS13	9078	-58,5	37,8	137,54	138,74	31,05
MS13	9092	-58,5	37,8	137,38	138,74	29,35
MS13	9106	-58,6	37,8	137,38	138,74	30,05
MS13	9119	-58,6	37,8	137,33	138,74	29,25
MS13	9140	-58,6	35,8	137,32	138,74	25,75

Fonte: Do autor (2021)

Para a utilização no modelo, conforme prática comum em RNAs, todos os dados foram normalizados para a faixa de domínio da função de ativação logística, isto é, entre zero e um,

pois, caso fossem mantidos os dados na faixa usual, a convergência do modelo poderia ser prejudicada ou até mesmo não ocorrer. Além disso, os dados em branco foram excluídos do conjunto. Para a normalização, optou-se pela técnica de normalização linear, utilizando a Equação 11, onde as variáveis com subíndice máximo e mínimo representam o maior e o menor valor da coluna de dados a ser normalizada e a variável sem subíndice representa o valor que está sendo normalizado. Todo o processo foi feito via algoritmo.

$$x = \left( \frac{x^* - x_{\text{mínimo}}^*}{x_{\text{máximo}}^* - x_{\text{mínimo}}^*} \right) \quad (11)$$

Quanto aos parâmetros do modelo (topologia da RNA), isto é, número de neurônios da rede, função de ativação, número de camadas escondidas, foram feitas diversas verificações, isso porque, conforme apontado por diversos autores e estudos referenciados neste trabalho, a topologia da camada escondida da RNA depende de testes, e não existe uma forma simples de determiná-la se não por tentativa e erro ou pelo uso de algoritmos evolutivos ou adaptativos. Foram testadas redes com 1 camada escondida, 2 camadas escondidas, funções de ativação linear e logística e de 4 a 128 neurônios por camada oculta.

O ajuste dos pesos pode ser feito através de diferentes funções de otimização. Foram testados algoritmos de otimização conhecidos, como o RMSprop (Tieleman e Hinton, 2012), AdaGrad (Duchi *et al.*, 2011), Adadelta (Zeiler, 2012) e ADAM (Kingma e Ba, 2015). O que apresentou melhor desempenho em geral foi o ADAM, dessa forma, foi o escolhido.

Além disso, foram separados os dados de treinamento e dados de teste na proporção de 70-30, ou seja, 70% dos dados foram destinados ao treinamento da rede e 30% aos testes, de modo a verificar os resultados obtidos. Dentro do conjunto de dados de treinamento, ainda foram separados mais 20% dos dados para validação. Todos os treinamentos foram monitorados e definiu-se um critério de parada antecipada do treinamento para quando o algoritmo não apresentasse mais evolução em 350 épocas<sup>2</sup> de treinamento. Para tentar contornar os erros de leitura, também foi testada a aplicação de médias móveis no conjunto de dados.

Durante a realização do treinamento, são monitoradas duas grandezas: a perda do treinamento (*training loss*) e a perda da validação (*validation loss*), ambas as perdas são calculadas com a fórmula do MSE (Equação 12) e com os dados de treinamento e validação,

---

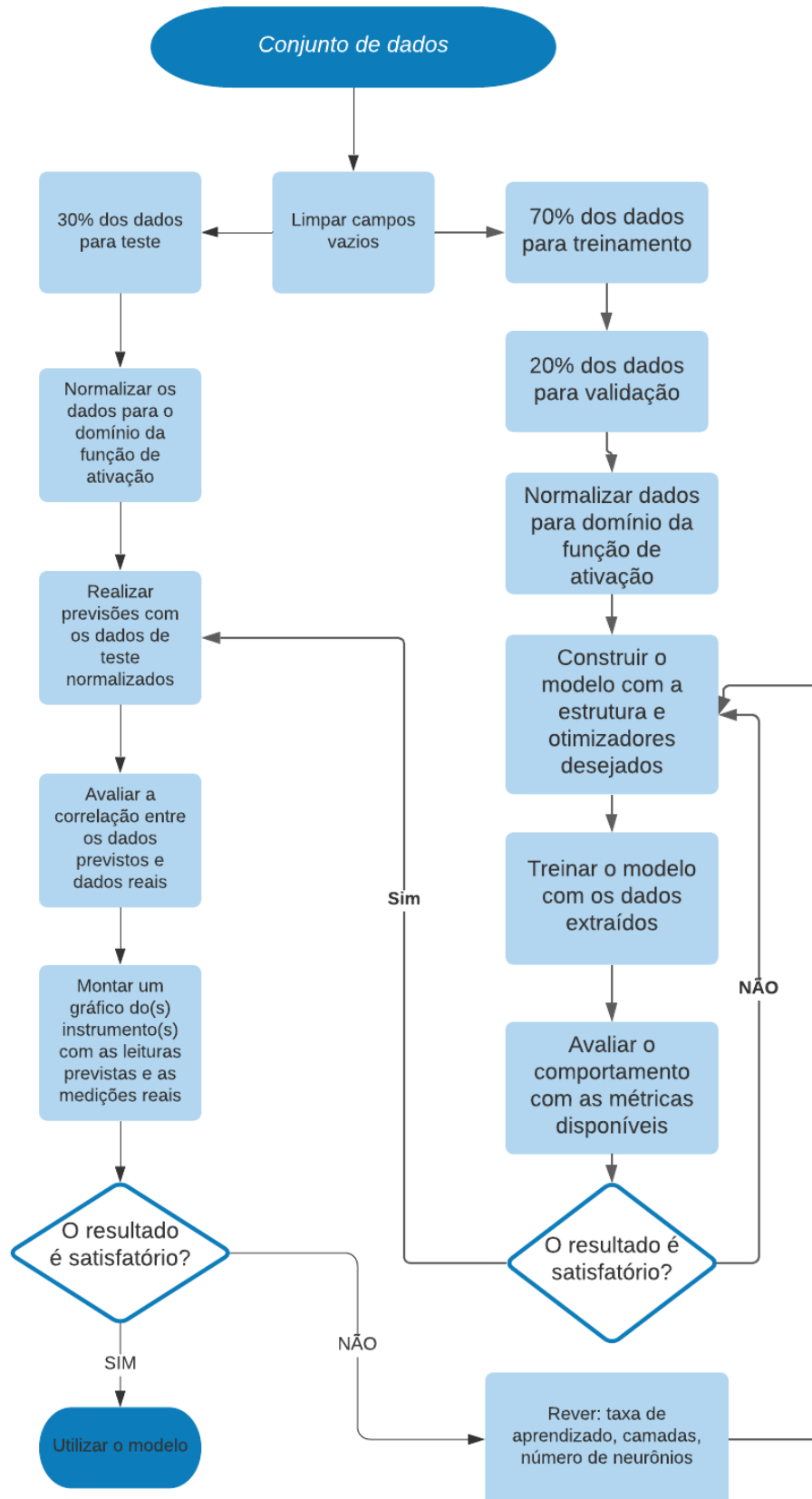
<sup>2</sup> Época: Número de iterações ou ciclos completos realizados pela rede neural artificial (HAYKIN, 1999)

respectivamente. Estas métricas são utilizadas para avaliar a ocorrência de sobreajuste e do erro de previsão e quanto mais próximas e menores, melhor o desempenho do modelo.

Para a montagem da RNA, este trabalho utilizou a linguagem Python, por ser uma das linguagens mais consolidadas no meio da ciência de dados, conforme apontado por Chollet (2018). Para as análises, foi utilizada a biblioteca Tensorflow, com implementações presentes no pacote Keras (KERAS API, 2021). Os dados foram organizados em arquivos Excel (.XLSX) e tratados via algoritmo com o auxílio da biblioteca Pandas (PANDAS LIBRARY, 2021).

Os resultados são apresentados na seção 4. O fluxograma apresentado na Figura 17 ilustra a parte básica do processo de análise por RNAs utilizado neste trabalho.

Figura 17 – Fluxograma do processo de montagem da Rede Neural



Fonte: do Autor (2021)

### 3.4.2 Modelos de previsão

Foram idealizados três modelos para a previsão dos recalques e deslocamentos, a saber:

- Modelo geral: uso dos dados de todos os instrumentos, com o intuito de mapear o comportamento de toda a estrutura;
- Modelo zoneado: uso dos dados de instrumentos separados por zonas de deslocamento, conforme comportamento esperado e descrito na seção 2.2.1.1;
- Modelo individual: uso dos dados de cada instrumento, individualmente.

Os resultados obtidos são discutidos na seção 4.3.1.

### 3.5 COMPARAÇÃO COM REGRESSÕES CONVENCIONAIS

A RNA trata de problemas de classificação e regressão com alto grau de complexidade. Outras formulações, ainda que mais simples, podem aproximar funções e permitir que sejam realizadas estimativas com boa qualidade e de forma rápida e simplificada. Além disso, o exercício de se estruturar um algoritmo de RNAs pode ser trabalhoso e demandar um tempo que as equipes de engenharia não dispõem e o modelo resultante é de difícil interpretação, apesar de poder levar a resultados bastante precisos.

Dessa forma, tendo em vista a facilidade de se realizar uma regressão logarítmica e a semelhança observada entre a função logarítmica e a série de dados dos instrumentos, foi realizada uma comparação entre as leituras previstas pela RNA e por uma função logarítmica. Para isso, utilizou-se da biblioteca NumPy (linguagem Python) e analisou-se caso a caso, isto é, instrumento por instrumento.

Os resultados obtidos na comparação são discutidos na seção 4.4.

### 3.6 DEFINIÇÃO DOS VALORES DE CONTROLE

Após a avaliação do desempenho da RNA em prever os deslocamentos e a comparação com os resultados obtidos a partir de uma regressão logarítmica, foi sugerida uma abordagem diferente para a definição dos valores de controle dos marcos superficiais, para o período de operação, considerando os resultados das previsões feitas. A abordagem baseia-se nos resultados obtidos das análises de redes neurais treinadas considerando-se a utilização das

máximas e mínimas móveis sobre o conjunto de dados de treinamento, o que permite a RNA aprender a contornar os desvios de leitura e estimar valores de controle próximos dos medidos no período considerado.

## **4 RESULTADOS**

A seção 4.1 faz uma análise do comportamento das barragens que são objeto deste estudo. A seção 4.3 discorre sobre os resultados dos testes feitos durante a elaboração das RNAs e o resultado das previsões de leituras. A seção 4.4 apresenta a comparação entre a regressão logarítmica e a regressão por RNAs.

### **4.1 ANÁLISES DO COMPORTAMENTO DAS BARRAGENS**

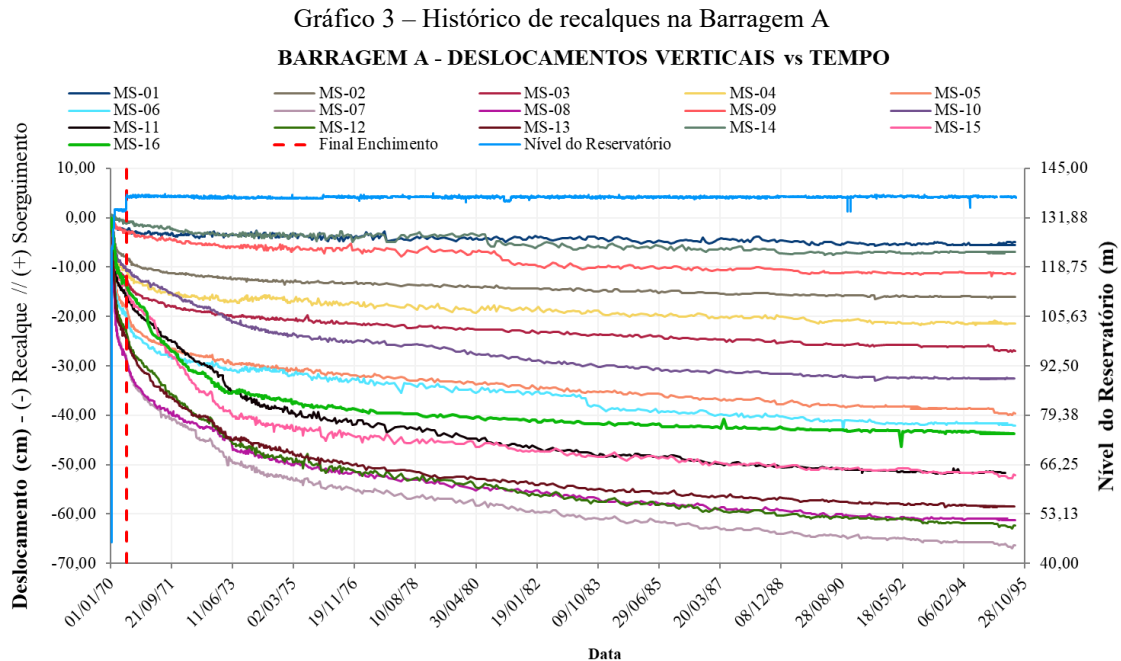
A presente seção visa realizar uma breve análise do comportamento de deformação do maciço de enrocamento das barragens em estudo. Foram avaliados os comportamentos face ao apresentado na seção 2.2.1.1 deste documento, bem como em relação aos deslocamentos previstos pelos projetistas de cada uma das barragens por meio de seus modelos numéricos (quando disponibilizados).

#### **4.1.1 Análise do comportamento – Deslocamentos superficiais da Barragem A**

Para a Barragem A foram disponibilizados dados de leitura a partir do período de operação, contando com o enchimento do reservatório.

A fim de identificar as condições esperadas de deslocamento, foi calculado o fator de forma do vale (Equação 01), verificando-se que esse empreendimento se encontra encaixado em um vale aberto, pois, obteve-se fator de forma de 6,9. Assim, é esperado que os recalques sejam maiores do que se o empreendimento estivesse encaixado em vales fechados e que os deslocamentos horizontais sejam menores, visto que não deve haver arqueamento significativo. Como consequência de a forma do vale ser aberta e de não haver arqueamento significativo pode-se destacar que as deformações por fluência devem perdurar por menos tempo do que se a Barragem estivesse em vale fechado. O Gráfico 3 apresenta o histórico de leituras dos recalques medidos pelos marcos superficiais da Barragem A.





Os recalques apresentados pelos marcos da Barragem A mostram que, conforme esperado, os maiores deslocamentos ocorrem durante a fase do enchimento do reservatório e há uma atenuação com o passar do tempo. Além disso, as maiores movimentações ocorrem na região central do barramento, especificamente nas partes mais altas (região da crista), com destaque para o MS-07, MS-08 e MS-12, que apresentam recalques acumulados superiores a 60 cm, o que condiz com o desempenho esperado, descrito na seção 2.2.1.1. O maior recalque é observado no marco MS-07. A Tabela 4 compila as últimas leituras realizadas nos marcos superficiais, a deformação específica para cada um dos instrumentos e a situação quanto à estabilização das leituras. Diz-se que a leitura está estabilizada quando ocorre certa horizontalização da série de dados no gráfico, o que indica ocorrerem variações apenas em torno de um valor médio.

Tabela 4 - Recalques nos marcos da Barragem A

Instrumento	Cota de instalação	Última leitura (cm)	Deformação específica (%)	Situação
MS-01	El. 85,00 m	5,0	0,24	Estabilizado
MS-02	El. 110,00 m	16,0	0,29	Estabilizado
MS-03	El. 139,44 m – Jusante	27,0	0,42	Não estabilizado

MS-04	El. 138,78 m – Montante - Laje	21,5	0,36	Estabilizado
MS-05	El. 139,38 m – Jusante	39,6	0,40	Não estabilizado
MS-06	El. 138,76 m – Montante - Laje	42,1	0,45	Não estabilizado
MS-07	El. 139,47 m – Jusante	66,4	0,47	Não estabilizado
MS-08	El. 138,71 m – Montante - Laje	61,3	0,44	Não estabilizado
MS-09	El. 55,00 m	11,3	0,20	Estabilizado
MS-10	El. 85,00 m	32,6	0,38	Estabilizado
MS-11	El. 111,00 m	51,7	0,46	Não Estabilizado
MS-12	El. 139,39m – Jusante	62,3	0,44	Não Estabilizado
MS-13	El. 138,74 m – Montante - Laje	58,6	0,42	Não Estabilizado
MS-14	El. 55,00 m	7,3	0,26*	Estabilizado
MS-15	El. 139,27 m – Jusante	52,1	0,53*	Não Estabilizado
MS-16	El. 138,78 m – Montante - Laje	43,8	0,49*	Não Estabilizado

\* Obs.: Estes três instrumentos encontram-se instalados em um local com históricos de problemas na laje (já corrigidos) que resultaram em aumento do fluxo pela barragem. Houve variações bruscas de leituras, cujas datas coincidem com alguns dos períodos em que se notou o aumento de vazões no medidor principal. Estes instrumentos foram desconsiderados no presente estudo.

Fonte: Do autor (2021)

Quanto aos deslocamentos horizontais, a Barragem A apresenta as maiores leituras nos marcos de crista, sendo os maiores movimentos observados no MS-08, MS-12, MS-13 e MS-16. Observa-se que os maiores movimentos no sentido de jusante ocorreram até 30 meses após o enchimento do reservatório, onde houve estabilização em todos os instrumentos. O Gráfico 4 apresenta o histórico de medições do deslocamento horizontal.

Gráfico 4 – Histórico de deslocamento horizontal na Barragem A

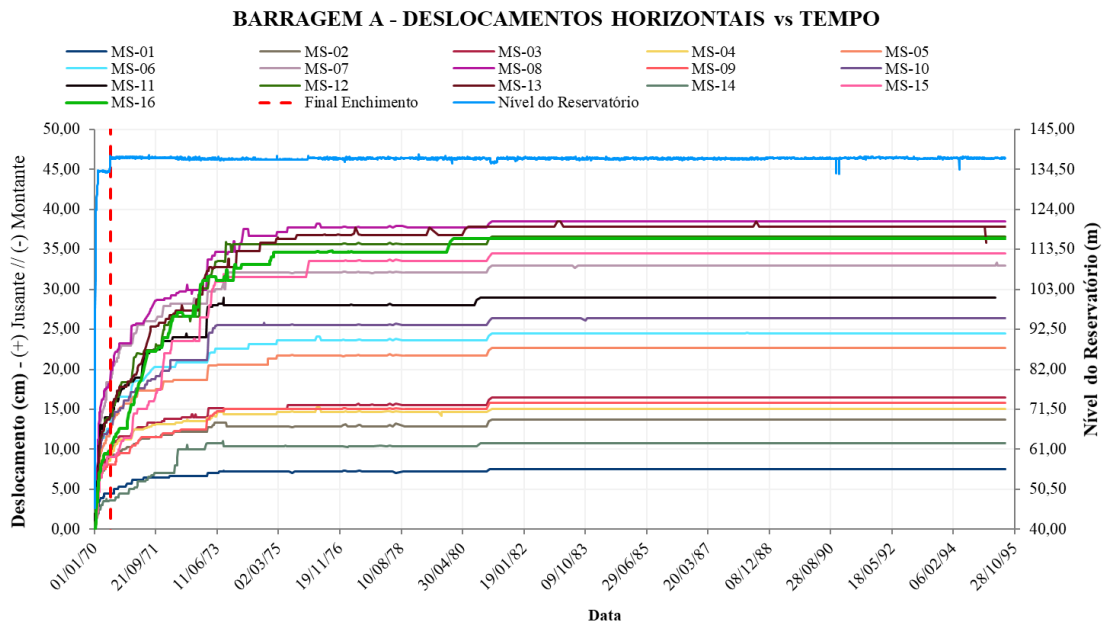


Tabela 5 – Deslocamentos horizontais na Barragem A - Período de operação

Instrumento	Cota de instalação	Última leitura (cm)	Situação
MS-01	El. 85,00 m	7,5	Estabilizado
MS-02	El. 110,00 m	13,7	Estabilizado
MS-03	El. 139,44 m – Jusante	16,5	Estabilizado
MS-04	El. 138,78 m – Montante - Laje	15,0	Estabilizado
MS-05	El. 139,38 m – Jusante	22,7	Estabilizado
MS-06	El. 138,76 m – Montante - Laje	24,5	Estabilizado
MS-07	El. 139,47 m – Jusante	33,0	Estabilizado
MS-08	El. 138,71 m – Montante - Laje	38,5	Estabilizado
MS-09	El. 55,00 m	15,8	Estabilizado
MS-10	El. 85,00 m	26,4	Estabilizado
MS-11	El. 111,00 m	29	Estabilizado
MS-12	El. 139,39m – Jusante	36,6	Estabilizado
MS-13	El. 138,74 m – Montante - Laje	35,8	Estabilizado
MS-14	El. 55,00 m	10,8	Estabilizado
MS-15	El. 139,27 m – Jusante	34,5	Estabilizado
MS-16	El. 138,78 m – Montante - Laje	36,3	Estabilizado

Fonte: Do autor (2021)

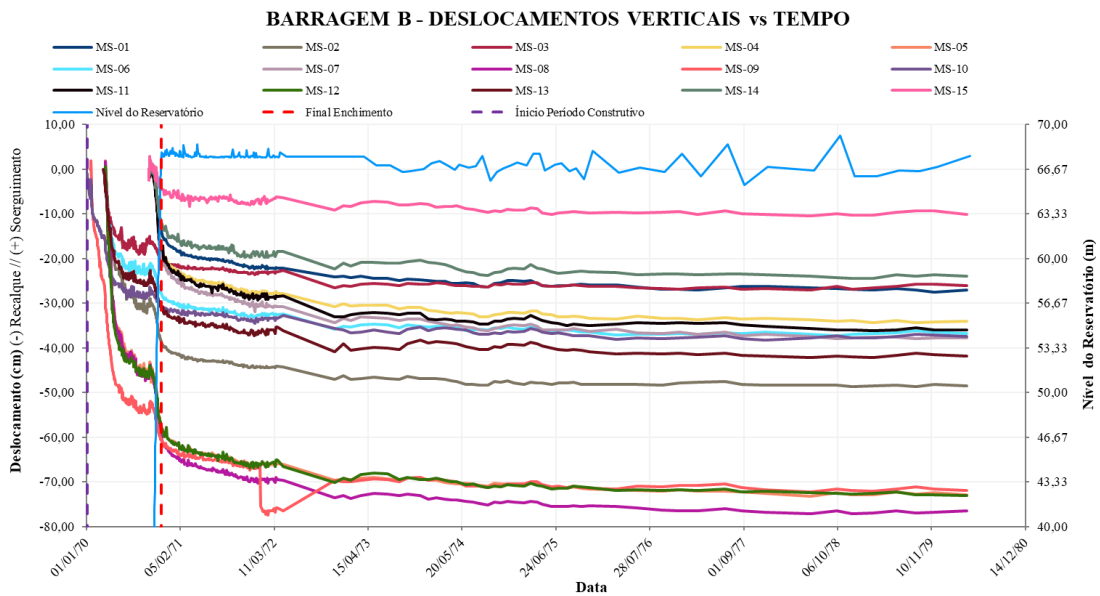
Por fim, observa-se um pequeno salto nas leituras de todos os marcos após uma primeira tendência de estabilização, que foi maior nos marcos MS-16, em decorrência do já mencionado evento com o paramento de montante (lajes de concreto). Tal evento ainda pode ser observado no início da série de leituras de deslocamento horizontal do MS-14 e MS-15, que apresentam comportamento um pouco diferente dos demais instrumentos no que concerne aos deslocamentos nos anos iniciais de monitoramento.

#### **4.1.2 Análise do comportamento – Deslocamentos da Barragem B**

A barragem B também se encontra encaixada em um vale aberto, porém, com menor fator de forma, de 5,60. Assim, as observações feitas para a Barragem A em termos de comportamento esperado também são válidas. No entanto, a altura da Barragem B é praticamente metade da altura da Barragem A, o que indica que os deslocamentos ocorrerão mais rapidamente e há tendência de que se estabilizem antes.

Diferentemente da Barragem A, o empreendedor responsável pela Barragem B forneceu os dados de deslocamento desde o início do monitoramento, englobando o período construtivo. O Gráfico 5 apresenta as leituras de recalque da Barragem B, onde é possível observar que existem dois patamares expressivos de deslocamento, sendo que o primeiro corresponde ao período construtivo e o segundo, à fase de enchimento do reservatório. Essa condição era esperada e foi descrita na seção 2.2.1.1.

Gráfico 5 – Histórico de leituras dos marcos da Barragem B

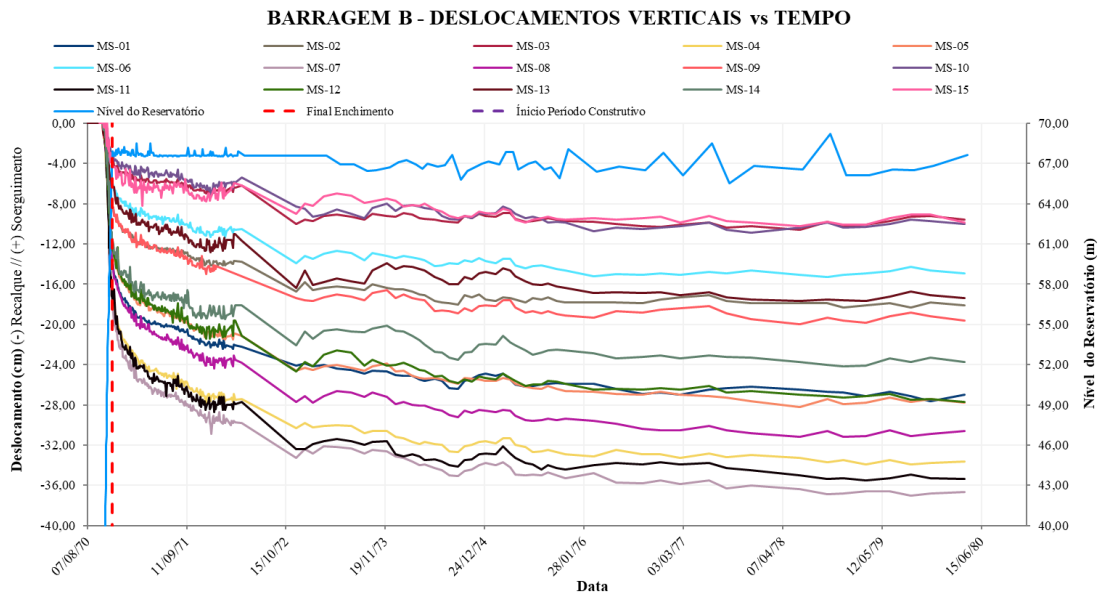


Fonte: Do autor (2021)

Como pode ser observado no Gráfico 5, os maiores recalques, contando com o período construtivo, ocorreram nos marcos MS-05, MS-08, MS-09 e MS-12, todos localizados na região central do barramento e superando os 70cm. Visando comparações com a Barragem A, foram descartadas as leituras do período construtivo em todas as análises posteriores deste trabalho.

Dessa forma, o Gráfico 6 apresenta as leituras desconsiderando a fase construtiva do empreendimento. Através da análise gráfica, é possível observar que durante a fase de operação os recalques foram mais expressivos nos marcos de crista, especificamente os da zona central, sendo o MS-04, MS-07 e MS-11 instrumentos em que o recalque acumulado ultrapassou os 30cm. Além destes, o já mencionado MS-08, instalado no paramento de jusante, apresentou recalque acumulado durante a fase de operação de pouco mais de 30cm.

Gráfico 6 – Comportamento da Barragem B - Recalques - Fase de operação



Fonte: Do Autor (2021)

A Tabela 6 compila as últimas leituras feitas em cada instrumento, onde também são apresentados a cota de instalação, a deformação específica, os valores de recalques esperados (definidos pela Projetista através de modelos numéricos) e a situação de cada instrumento atualmente. As leituras feitas nos últimos 3 anos de operação não mostram evolução nos deslocamentos verticais, que apresentam-se variando em torno de um valor médio e, portanto, aparentemente estão estabilizados ou em fase de estabilização.

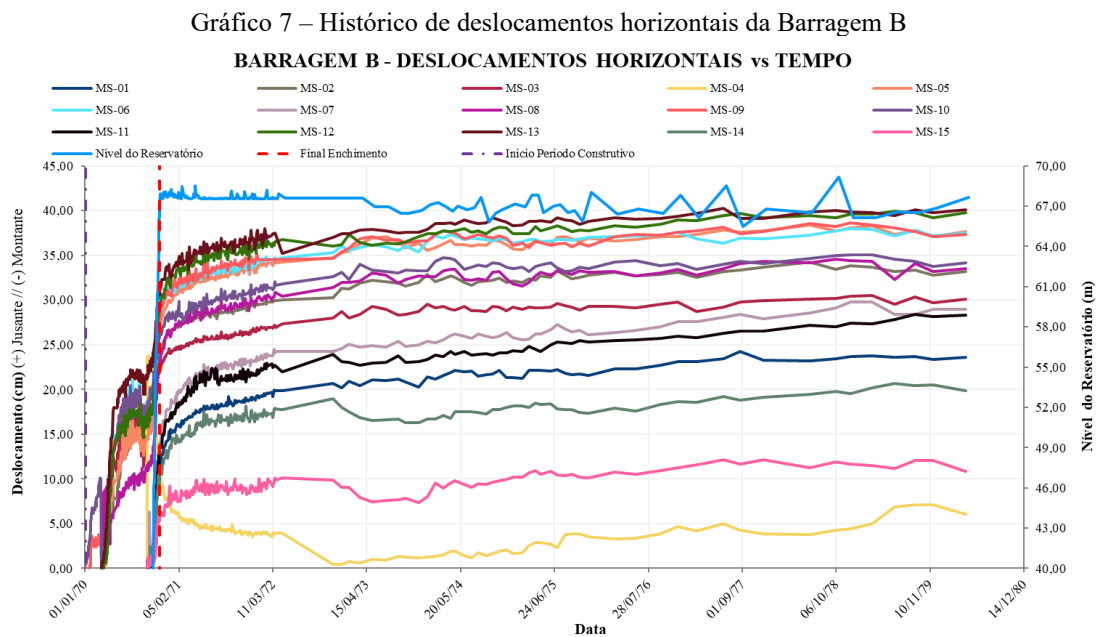
Tabela 6 - Recalques observados na Barragem B - Período de Operação

Instrumento	Cota de instalação	Última leitura (cm)	Recalque esperado (cm)	Deformação específica (%)	Situação
MS-01	El. 73,10 m	27,0	10,46	0,37	Estabilizado
MS-02	El. 49,45 m	18,1	7,30	0,36	Estabilizado
MS-03	El. 33,64 m	9,6	5,84	0,28	Estabilizado
MS-04	El. 73,11 m	33,6	11,54	0,46	Estabilizado
MS-05	El. 49,37 m	27,8	5,53	0,56	Estabilizado
MS-06	El. 33,71 m	14,9	4,38	0,44	Estabilizado
MS-07	El. 73,09 m	36,7	11,54	0,50	Estabilizado
MS-08	El. 51,15 m	30,6	5,53	0,60	Estabilizado
MS-09	El. 36,19 m	19,6	4,38	0,54	Estabilizado
MS-10	El. 21,11 m	10,0	2,94	0,47	Estabilizado
MS-11	El. 73,09 m	35,4	11,54	0,48	Estabilizado

MS-12	El. 49,44 m	27,7	5,53	0,56	Estabilizado
MS-13	El. 33,39 m	17,4	4,38	0,52	Estabilizado
MS-14	El. 33,64 m	23,7	10,46	0,70	Estabilizado
MS-15	El. 73,10 m	9,9	3,71	0,14	Estabilizado

Fonte: Do autor (2021)

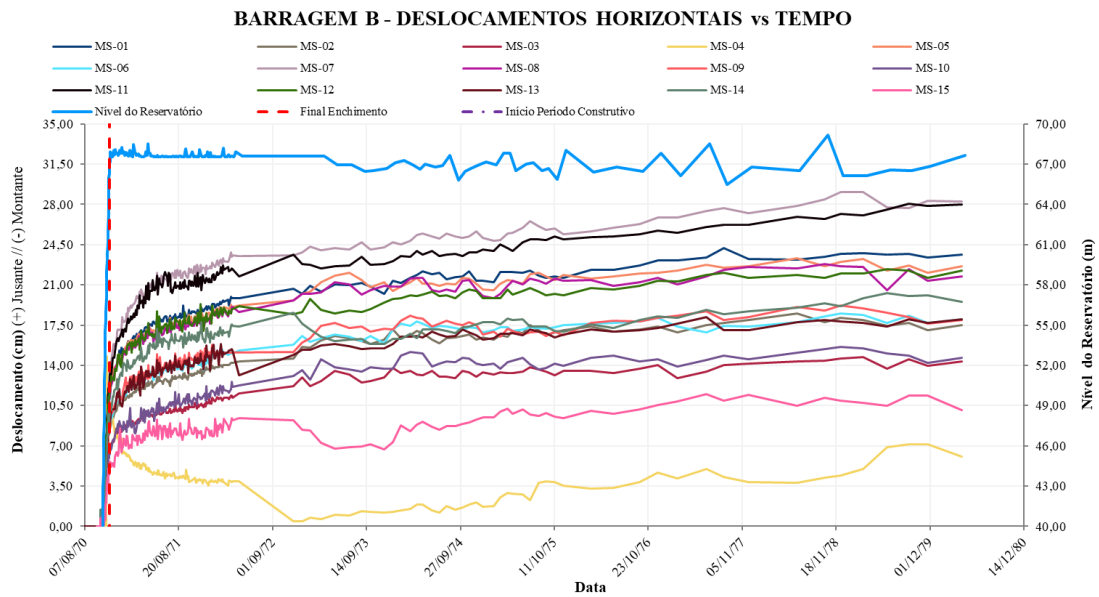
Quanto aos deslocamentos horizontais, assim como observado nos recalques, nota-se que existem duas zonas verticalizadas, uma correspondente à fase construtiva e a outra correspondente à de enchimento do reservatório. O Gráfico 7 apresenta o histórico de leituras, incluindo o período construtivo, onde nota-se que os maiores deslocamentos horizontais ocorreram, na fase construtiva no MS-05, MS-06, MS-08, MS-09, MS-12 e MS-13, todos na região central do barramento.



Fonte: Do autor (2021)

Se for desconsiderada a fase de construção (Gráfico 8), nota-se que os maiores deslocamentos para jusante também são observados na região central da barragem. Apresentam-se com deslocamentos acima dos 20 cm o MS-01, MS-07, MS-11 e MS-14 (Crista) e o MS-05 e MS-08 (paramento de jusante).

Gráfico 8 – Deslocamentos horizontais para o período de operação da barragem B



Fonte: Do autor (2021)

As últimas leituras de deslocamento horizontal, bem como os valores previstos pela empresa Projetista são apresentados na Tabela 7. É possível perceber que ocorrem diferenças de até 10 vezes entre os deslocamentos previstos e os deslocamentos observados, o que pode decorrer de muitos fatores, incluindo um processo executivo diferente do previsto (compactação insuficiente).

Tabela 7 – Deslocamentos horizontais - Barragem B - Fase de operação

Instrumento	Cota de instalação	Última	Deslocamento	Situação	
		leitura	esperado		
		(cm)	(cm)		
MS-01	El. 73,10 m	23,62	2,62	Não Estabilizado	
MS-02	El. 49,45 m	17,48	2,84	Estabilizado	
MS-03	El. 33,64 m	14,33	1,85	Estabilizado	
MS-04	El. 73,11 m	6,08	5,03	Não Estabilizado	
MS-05	El. 49,37 m	22,60	7,76	Não Estabilizado	
MS-06	El. 33,71 m	18,03	5,86	Estabilizado	
MS-07	El. 73,09 m	28,23	5,03	Não Estabilizado	
MS-08	El. 51,15 m	21,72	7,76	Estabilizado	
MS-09	El. 36,19 m	17,93	5,86	Não Estabilizado	
MS-10	El. 21,11 m	14,64	3,92	Estabilizado	
MS-11	El. 73,09 m	27,98	5,03	Não Estabilizado	
MS-12	El. 49,44 m	22,21	7,76	Estabilizado	



MS-13	El. 33,39 m	18,02	5,86	Estabilizado
MS-14	El. 33,64 m	19,50	2,62	Não Estabilizado
MS-15	El. 73,10 m	10,13	0,65	Estabilizado

Fonte: Do autor (2021)

Ressalta-se que o MS-04, instrumento instalado na crista, apresentou deslocamento relativo para montante durante a fase do enchimento do reservatório, retornando praticamente à posição de sua construção, o que não é esperado. Sob ação do carregamento do reservatório, espera-se que haja deslocamento para jusante.

Os únicos instrumentos que poderiam confirmar tal movimento seriam os extensômetros múltiplos de haste, porém, para a Barragem B, os extensômetros estão locados na seção central, em cabines de leitura na posição do MS-08, MS-09 e MS-10 e não existem extensômetros na seção do MS-04. O extensômetro mais próximo do local está instalado em cabine de leitura logo abaixo do MS-08, e a placa locada junto ao eixo da barragem indica movimento absoluto para jusante, contrariando o apresentado pelo MS-04. Além disso, a projetista previu deslocamentos semelhantes para o MS-04 e MS-07, o que não se observou durante a fase de operação. Dessa forma, tendo em vista o exposto, o MS-04 foi desconsiderado neste estudo.

#### 4.1.3 Breves comentários quanto ao comportamento de ambas as barragens

A análise dos dados de deslocamentos superficiais da Barragem A e da Barragem B apontam que ambas as estruturas apresentam comportamento dentro dos padrões observados em outras BEFCs e seguem o padrão relatado na bibliografia. Além disso, as barragens apresentam recalques específicos máximos próximos a 0,5%, dentro dos padrões normais de comportamento destas estruturas, que segundo a bibliografia podem atingir até 1,1% sem apresentar problemas.

A diferença observada no estudo de Acosta-González *et al.* (2018) entre os deslocamentos previstos e os deslocamentos reais – brevemente comentado na seção 1 do presente documento – também é notada na Barragem B. Essa diferença acaba por impossibilitar que sejam adotados, na fase atual de operação, os valores previstos pela Projetista como valores de controle para instrumentação, pois, caso essa fosse a prática, todos os instrumentos estariam ultrapassando estes valores sem que houvessem problemas com a estrutura. Na verdade, é

importante frisar que a prática nacional, estabelecida no documento Critério de Projetos Civil de Usinas Hidrelétricas de autoria da Eletrobrás (2003) e discutida na seção 2.4, define que os valores de controle devem ser reavaliados frequentemente em decorrência de eventos inesperados ou fenômenos de fluência (o que ocorre nas BEFCs) sempre que houver dados suficientes para a calibração dos modelos.

Por fim, observa-se a boa qualidade do conjunto de leituras, que apresentam pouca variabilidade, praticamente sem oscilações e condizentes com a normalidade das BEFCs. Curiosamente, um comparativo entre a Barragem A e B pode mostrar que em termos absolutos, a Barragem A que possui praticamente o dobro da altura da Barragem B, também apresenta praticamente o dobro de recalque em sua zona central, o que é notado pelas equivalências no recalque específico. As deformações horizontais, no entanto, não seguem exatamente a mesma tendência. Há de se ressaltar, no entanto, que essa relação costuma ser não linear, dado que os valores de deslocamento estão intimamente atrelados à deformabilidade do enrocamento e da fundação e aos outros fatores anteriormente mencionados neste trabalho e não dependem somente da relação de alturas.

#### 4.2 MONTAGEM DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Conforme descrito na seção 2.5, a topologia da RNA precisa ser testada para ficar adequada ao conjunto de dados em questão. É difícil estabelecer uma abordagem que funcione para todos os casos, visto que, RNAs podem ser aplicadas aos mais diversos campos da ciência e aos mais variados conjuntos de dados. Dessa forma, os testes aqui desenvolvidos envolveram variações no número de camadas, no número de neurônios, nos algoritmos de treinamento e nas funções de ativação.

Durante os testes, observou-se que:

- Redes com mais de 2 camadas escondidas, para um mesmo número de neurônios ou para números diferentes, não apresentaram melhor convergência e, inclusive, algumas não convergiram;
- Redes com 2 camadas escondidas apresentaram diferenças pouco expressivas ao se considerar 4, 16, 32, 64 ou 128 neurônios por camada;
- Redes com apenas 1 camada escondida não apresentaram bom desempenho ou apresentaram ajuste excessivo aos dados;
- A função de ativação linear retificada foi a que levou a melhores resultados ao se considerar apenas um instrumento por vez. Nos demais casos a função logística levou aos melhores resultados.

A topologia que mostrou melhor desempenho geral, para todos os casos, foi uma RNA constituída de uma camada de entrada, com o número de neurônios igual ao número de variáveis (3), e mais duas camadas escondidas com 64 neurônios em cada uma. Dentre as funções de ativação, a linear foi que a que apresentou melhor desempenho e menor ocorrência de sobreajuste.

A utilização dessa arquitetura, nesta topologia, permitiu que para todos os marcos superficiais fossem previstas leituras de deslocamento vertical e horizontal com mapeamento da influência das variáveis consideradas. O nível do reservatório foi o parâmetro que apresentou maior influência.

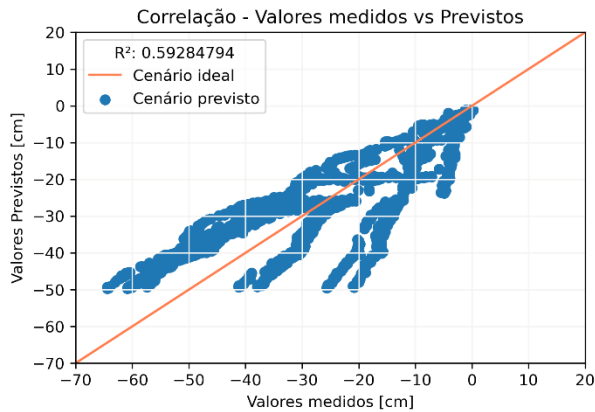
### 4.3 PREDIÇÕES REALIZADAS COM O MODELO DE REDES NEURAIS

A seguir, são apresentados resultados dos modelos construídos neste trabalho (seção 4.3.1), bem como os resultados das previsões considerando o modelo de melhor desempenho para cada uma das barragens (4.3.2 e 4.3.3).

#### 4.3.1 Modelos de predição

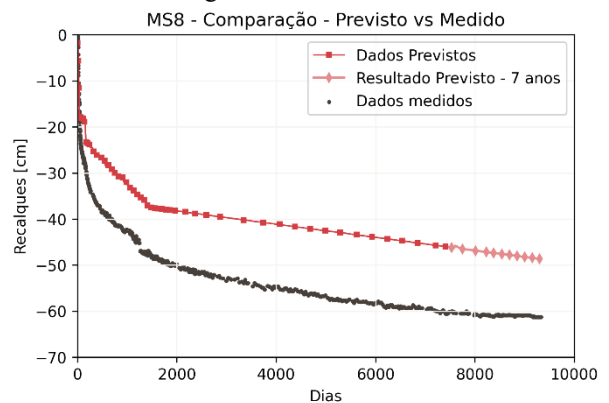
O primeiro algoritmo testado foi montado de modo a considerar nos dados de treinamento e teste as medições todos os marcos superficiais de uma só vez e, tem por objetivo, verificar a possibilidade de se aprender o comportamento da barragem de um modo geral, em função de parâmetros simples como a altura de instalação dos marcos superficiais em relação à fundação. A RNA montada considerando os dados de todos os instrumentos apresentou coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre os dados medidos e os dados previstos pelo modelo de 0,59, apresentando desempenho considerado insatisfatório. O Gráfico 9 apresenta o gráfico de dispersão dos pontos medidos, onde é possível observar que existem três tendências diferentes no modelo, ao passo que o Gráfico 10 apresenta uma tentativa de previsão no MS-8 da Barragem A, e nota-se a grande diferença entre os valores previstos e medidos.

Gráfico 9 – Avaliação de desempenho do modelo generalista – Coeficiente de determinação – MS8



Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 10 – Tentativa de previsão de Recalque MS8 - modelo generalista – Dados – MS8



Fonte: do Autor (2021)

Foram feitas tentativas de ajuste ao modelo, com mudança de parâmetros, funções de ativação diferentes e exclusão de variáveis, no entanto, não foi possível obter um resultado razoável considerando todos os dados disponíveis.

Durante a investigação de possíveis soluções para o problema, observou-se que as três tendências visualizadas no Gráfico 9 estavam associadas ao comportamento da barragem frente às deformações, isto é, as três tendências correspondem a diferentes grupos de instrumento, a saber:

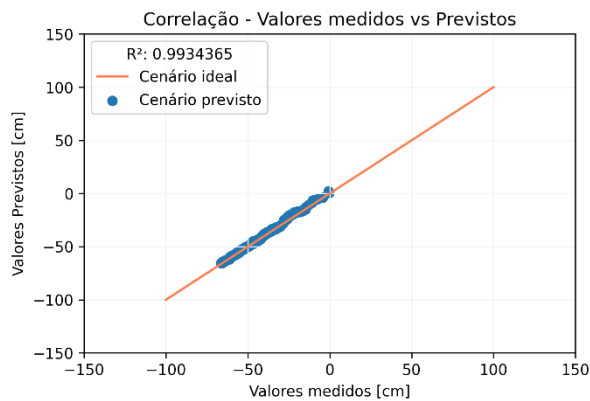
- Tendência 1 - Amostras com valores previstos de até 50cm e valores medidos de até 60cm (mais à esquerda do gráfico): Correspondem aos instrumentos instalados na seção de maior altura e na zona central da Barragem A (MS-7 e MS-8, por exemplo)
- Tendência 2 - Amostras com valores previstos de até 50cm e valores medidos de até 50cm (mais ao meio do gráfico): Correspondem aos instrumentos instalados nas partes mais altas do talude de jusante, porém, não na seção de maior altura (MS11, por exemplo)
- Tendência 3 - Amostras com valores previstos de até 50cm e valores medidos de até 25cm (mais à direita do gráfico): Correspondem aos instrumentos instalados nas partes mais baixas do talude de jusante ou mais próximos às ombreiras, porém, não na seção de maior altura (MS3 e MS4, por exemplo)

Essa observação confirma o que se conhece sobre deslocamentos de BEFCs, e assim, o algoritmo por zonas se justificaria.

### Modelo por zonas:

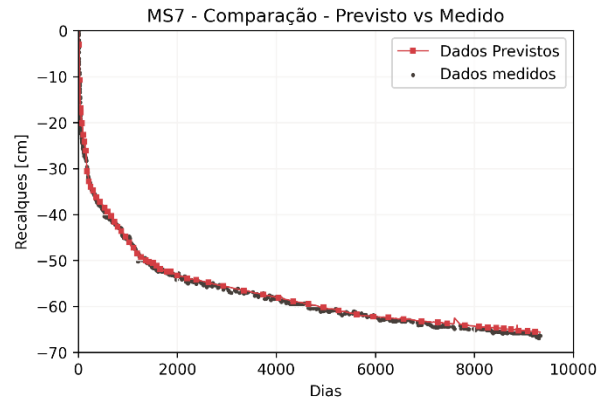
Diante do exposto, foi feito um treinamento considerando apenas os dados dos marcos MS-7 e MS-8, instalados na crista, na seção de maior altura. O Gráfico 11 apresenta a relação entre valores previstos e valores medidos para o MS-7 e MS-8, onde observou-se coeficiente de determinação de 0,98. Por outro lado, o Gráfico 12 apresenta uma tentativa de previsão de leituras no MS-7, onde percebe-se a boa aderência dos dados previstos aos medidos.

Gráfico 11 – Avaliação de desempenho do modelo por zona da barragem – Coeficiente de determinação – MS7



Fonte: do Autor (2021)

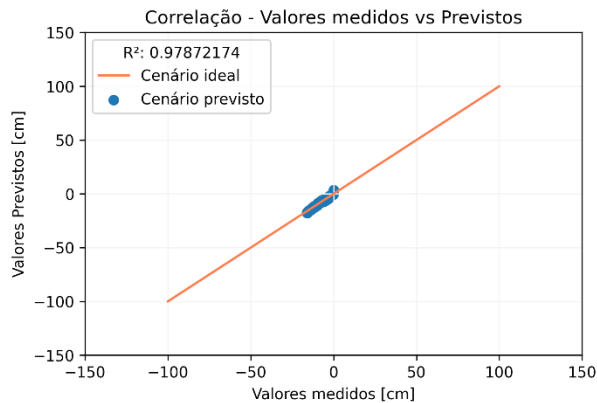
Gráfico 12 – Avaliação de desempenho do modelo por zona da barragem – Dados – MS7



Fonte: do Autor (2021)

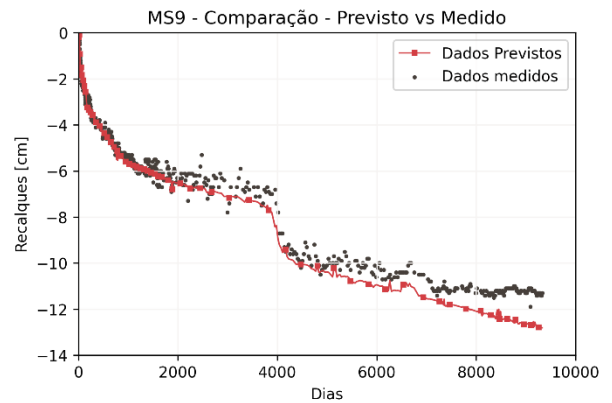
Outro teste foi feito considerando os marcos MS-1, MS-2 e MS-9, que fazem parte do grupo de Tendência 3. Os resultados apontaram boa aproximação. O Gráfico 13 apresenta as relações entre os dados medidos e previstos, ao passo que o Gráfico 14 apresenta uma tentativa de prever os valores de leitura do MS-9.

Gráfico 13 – Avaliação de desempenho do modelo por zona da barragem – Coeficiente de determinação – MS9



Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 14 – Avaliação de desempenho do modelo por zona da barragem – Dados – MS9

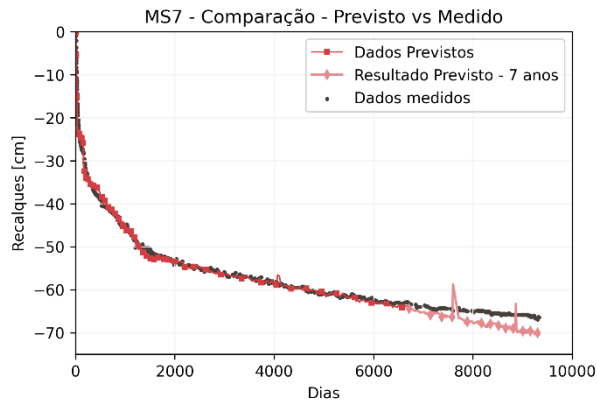


Fonte: do Autor (2021)

Ressalta-se, no entanto, que o modelo foi treinado com parte destes dados que estão sendo previstos, e na prática, o que é de real interesse é a previsão de leituras ainda não feitas. Assim, foram excluídos os últimos 7 anos do conjunto de dados treinamento, de modo a garantir que a RNA não conheça estas leituras e aprenda o comportamento do instrumento a partir das leituras anteriores. A verificação foi feita através da previsão das leituras removidas do conjunto (últimos 7 anos). Para realizar a verificação, foi utilizado o modelo treinado com as RNAs, e como dados de entrada foram consideradas as variáveis (nível do reservatório, temperatura e tempo) referentes ao período em que foram excluídas as leituras.

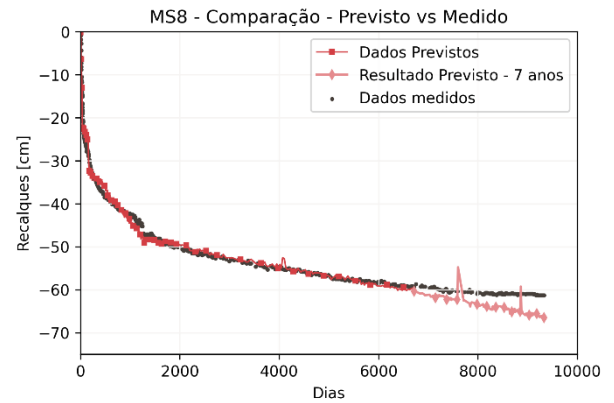
De forma geral, os testes apontaram que a adequabilidade das leituras previstas ao conjunto de leituras real depende de cada instrumento. Do Gráfico 15 ao Gráfico 4 é possível observar o que se visualizou para os marcos MS-7 e MS-8.

Gráfico 15 – Previsão de 7 anos – MS-7 – modelo por zonas



Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 16 – Previsão de 7 anos – MS-8 – modelo por zonas



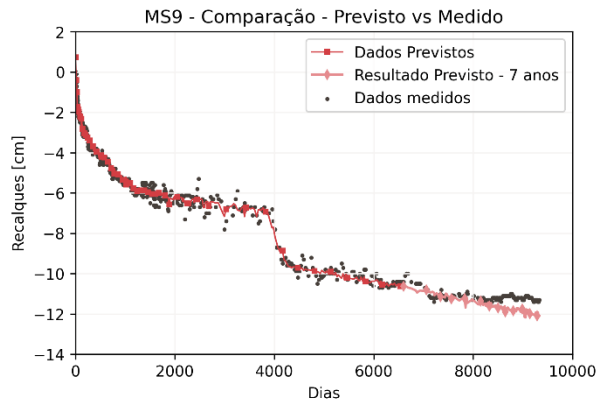
Fonte: do Autor (2021)

### Modelo individual:

No modelo individual, a grandeza altura em relação à fundação foi removida, pois, passa a ser constante e não mais variável. Além disso, o conjunto de dados passa a ser consideravelmente menor. Entretanto, mesmo com essas considerações, o modelo individual apresentou resultados melhores na maioria dos casos que os outros dois testados. Foi observada uma redução no erro de previsão, para todos os períodos considerados anteriormente.

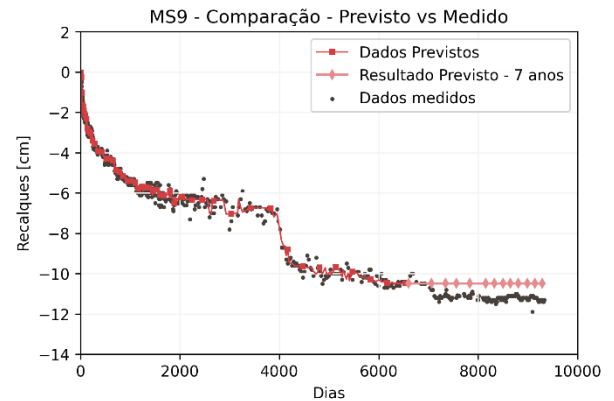
Em virtude do bom desempenho, foram testadas as funções de ativação linear e logística novamente, onde, verificou-se menor sobreajuste com a função de ativação linear. Os Gráfico 17 e Gráfico 18 apresentam uma comparação de previsão de leitura no instrumento MS-9, onde verifica-se o melhor ajuste à série de dados com o uso da função linear, apesar de ainda haver um desvio nas leituras.

Gráfico 17 – Previsão de 7 anos – MS-9 – função de ativação linear – modelo individual



Fonte: do Autor (2021)

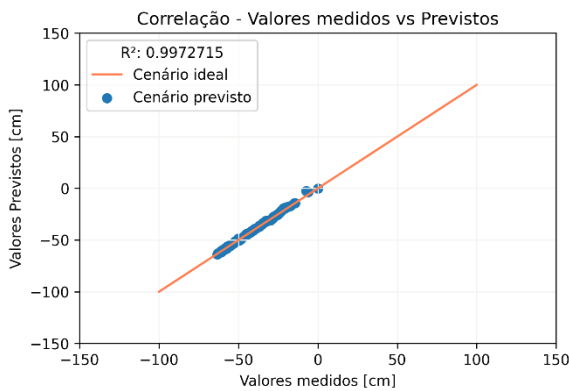
Gráfico 18 – Previsão de 7 anos – MS-9 – função de ativação logística – modelo individual



Fonte: do Autor (2021)

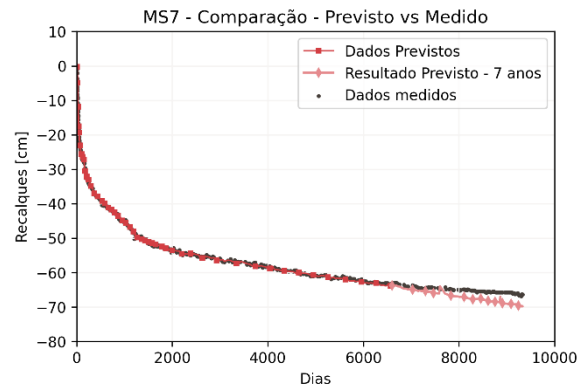
O Gráfico 20 apresenta a previsão de leitura do marco MS-7, utilizando-se das proposições supracitadas. Observa-se que, de modo geral, há boa previsibilidade das leituras futuras para o período considerado.

Gráfico 19 – Previsão de 7 anos – MS-7 – modelo individual



Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 20 – Previsão de 7 anos – MS-7 - modelo individual



Fonte: do Autor (2021)

#### 4.3.2 Previsões na Barragem A

A previsão de leituras futuras e sua comparação com o comportamento esperado para a estrutura é a chave para a tomada de decisões no que diz respeito à segurança estrutural. Com a definição do comportamento normal, é possível determinar o que foge do normal. Dessa forma, para a Barragem A foram previstos os recalques e os deslocamentos horizontais. Todas as previsões envolveram a exclusão dos últimos 7 anos de leitura. Salienta-se que o período de 7 anos considerado na previsão de leituras futuras diz respeito à frequência de realização do



estudo de Revisão Periódica de Segurança, definido pela Resolução n° 696/2015 da ANEEL, onde está postulado que, para barragens classificadas como B, onde sempre há alta categoria de risco ou dano potencial associado (caso da barragem A), as Revisões Periódicas de Segurança devem ser feitas a cada 7 anos.

### *Recalques*

Os resultados das previsões apontaram que os recalques podem ser previstos com boa aproximação para o período de 7 anos quando o conjunto de leituras é grande o suficiente para que o comportamento seja aprendido pela RNA (caso da Barragem A). Do Gráfico 21 ao Gráfico 24 tem-se a relação entre os dados medidos (informação de campo), previsão feita pela rede para o histórico de treinamento (dados previstos) e o resultado previsto para os 7 anos. Nestes casos é avaliada também, para alguns dos instrumentos, a aplicação ou não de médias móveis sobre o conjunto de dados, como uma tentativa de reduzir as oscilações dos dados medidos e melhorar as previsões das redes.

Gráfico 21 – Recalque - previsão de 7 anos – MS-1 – Sem médias móveis

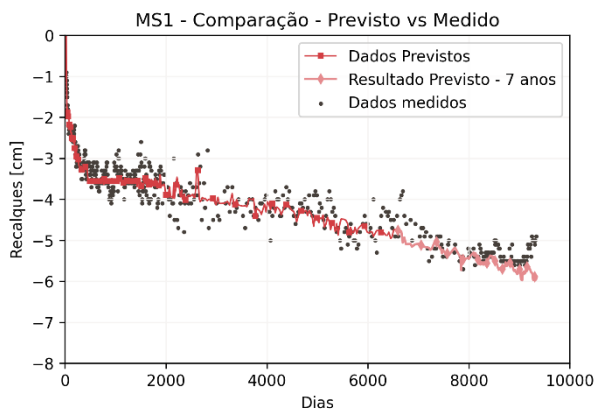


Gráfico 22 – Recalque - Previsão de 7 anos – MS-1 – Com médias móveis (média a cada 6 medições)

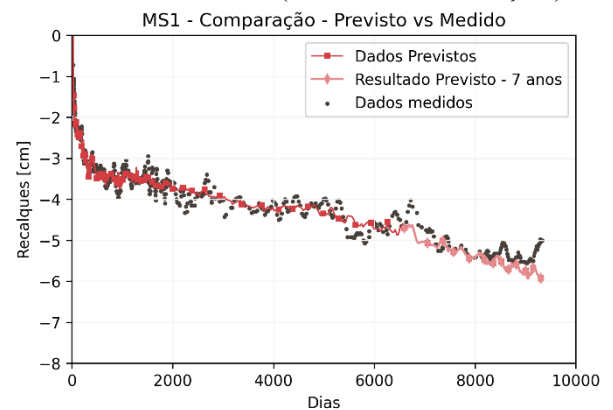
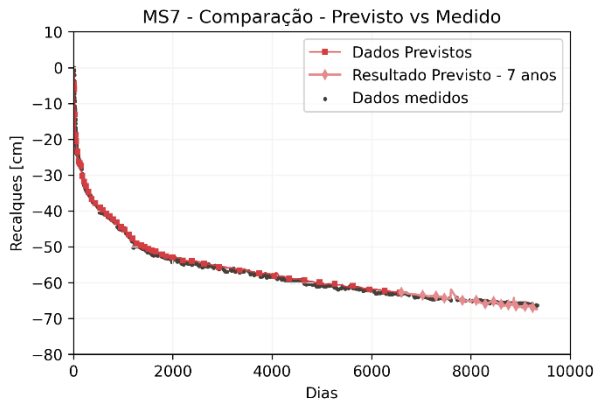
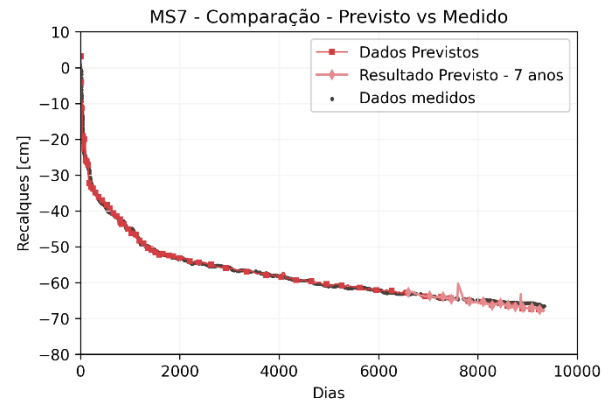


Gráfico 23 – Recalque - Previsão de 7 anos – MS-7 – sem médias móveis



Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 24 – Recalque -Previsão de 7 anos – MS-7 – com médias móveis



Fonte: do Autor (2021)

O resultado geral é apresentado na Tabela 8. O recalque previsto pela RNA e o medido pelo instrumento são apresentados para a média dos últimos 7 anos. A quantificação do erro é apresentada através do Erro Médio Absoluto (EMA) e do Erro Médio Quadrático (EMQ), calculados entre os valores previstos e os medidos nos últimos 7 anos.

Tabela 8 – Resultados da previsão de recalques na Barragem A (Médias em cm)

Instrumento	Rede Neural	Real	Épocas	EMA	EMQ
	Média (desvio padrão)	Média (desvio padrão)			
MS1	5,20 (0,21)	5,19 (0,36)	1087	0,2200	0,0700
MS2	16,23 (0,30)	15,86 (0,22)	3000	0,3541	0,1440
MS3	26,00 (0,50)	25,89 (0,51)	1847	0,2724	0,1043
MS4	21,42 (0,54)	21,11 (0,43)	1513	0,3746	0,2143
MS5	38,66 (0,96)	38,38 (0,68)	3000	0,4533	0,2994
MS6	40,77 (0,21)	41,39 (0,56)	3000	0,6827	0,5631
MS7	65,06 (1,38)	65,10 (0,87)	1828	0,5255	0,4195
MS8	59,94 (0,34)	60,55 (0,64)	2824	0,6675	0,5169
MS9	11,10 (0,25)	11,10 (0,30)	878	0,2081	0,0596
MS10	32,26 (0,34)	32,28 (0,38)	3000	0,1920	0,0588
MS11	51,56 (0,80)	51,01 (0,75)	2851	0,4292	0,3089
MS12	61,92 (1,16)	61,23 (0,78)	3000	0,7229	0,6744
MS13	58,22 (0,61)	57,67 (0,66)	3000	0,3319	0,1506

Fonte: Do autor (2021)

Observou-se que boas previsões foram obtidas para a maioria dos instrumentos da Barragem A. Alguns instrumentos apresentaram pequenos desvios na série prevista ou não acompanharam perfeitamente a série histórica, porém, estes desvios observados não foram disruptivos a ponto de descredenciar a RNA como aproximadora da função que define os

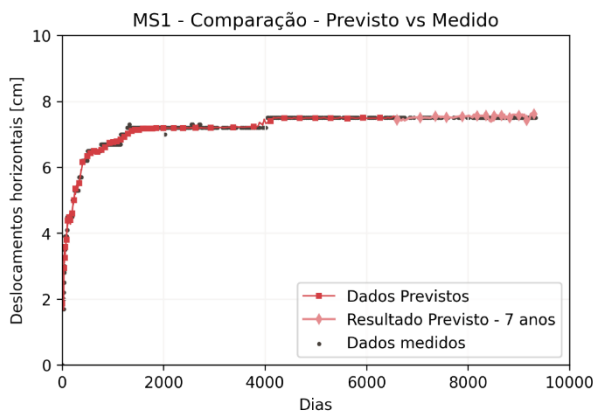
deslocamentos em questão. A existência de desvios está em parte associada à ausência de variáveis que contribuam no aprendizado da rede sobre os recalques. Ademais, a aplicação de médias móveis como tentativa de reduzir do ruído das leituras não apresentou diferenças significativas para a redução do erro de previsão na Barragem A.

De modo geral, nota-se que os erros médios absolutos estiveram em torno de 0,40 cm e os erros médios quadráticos em torno de 0,27 cm. Isso demonstra que os valores previstos não estão distantes dos medidos e que não existem muitos *outliers* nas previsões.

### *Deslocamentos*

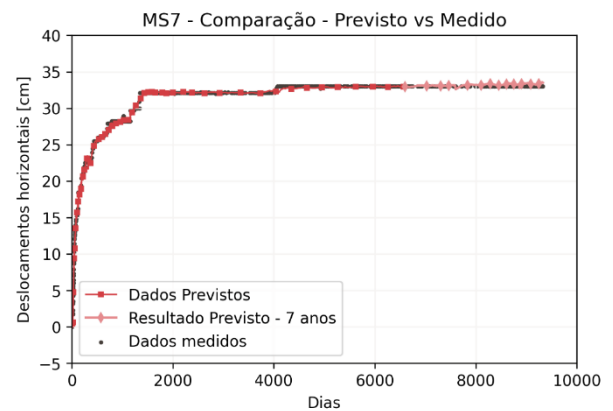
Assim como os recalques, os deslocamentos horizontais foram previstos com boa aproximação. A RNA conseguiu aproximar os resultados com elevada precisão, sem necessitar do tratamento por médias móveis. O Gráfico 25 e o Gráfico 26 apresentam as leituras previstas para alguns dos instrumentos. Ressalta-se que os instrumentos aqui apresentados foram escolhidos aleatoriamente e que os demais instrumentos apresentaram resultados semelhantes, porém, não são aqui ilustrados.

Gráfico 25 – Deslocamentos horizontais - Previsão de 7 anos – MS-1



Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 26 – Deslocamentos horizontais - previsão de 7 anos – MS-7



Fonte: do Autor (2021)

A Tabela 9 apresenta as leituras médias dos últimos 7 anos previstos pela RNA e os valores reais medidos para os deslocamentos da Barragem A. Assim como no recalque, foram quantificados os erros: médio absoluto e médio quadrático.

Tabela 9 – Resultados da previsão dos deslocamentos na Barragem A (Médias em cm)

Instrumento	Rede Neural	Real	Épocas	EMA	EMQ
	Média (desvio padrão)	Média (desvio padrão)			
MS1	7,54 (0,04)	7,50 (0,00)	3000	0,0487	0,0036
MS2	13,57 (0,11)	13,70 (0,00)	3000	0,1309	0,0301
MS3	16,61 (0,03)	16,50 (0,00)	3000	0,1100	0,0125
MS4	15,14 (0,02)	15,00 (0,00)	3000	0,1441	0,0214
MS5	22,41 (0,08)	22,70 (0,00)	3000	0,2854	0,0878
MS6	25,17 (0,07)	24,50 (0,01)	3000	0,6651	0,4470
MS7	33,22 (0,15)	33,00 (0,03)	3000	0,2337	0,0715
MS8	37,6 (0,18)	38,50 (0,00)	3000	0,9052	0,8330
MS9	15,82 (0,04)	15,80 (0,00)	3000	0,0384	0,0018
MS10	25,98 (0,05)	26,40 (0,00)	3000	0,4185	0,1775
MS11	28,68 (0,10)	29,00 (0,00)	3000	0,3148	0,1088
MS12	36,61 (0,21)	36,6 (0,00)	3000	0,1332	0,0446
MS13	37,80 (0,12)	37,80 (0,00)	3000	0,1211	0,0474

Fonte: Do autor (2021)

A qualidade da previsão de deslocamentos foi superior à da previsão de recalques. Tal afirmação é baseada nos erros medidos, onde o EMA e o EMQ apresentam médias de entre 0,28 e 0,15 cm, respectivamente. O melhor cenário de previsão observado neste caso decorre da pequena quantidade de erros de leitura na grandeza do deslocamento, muito menor do que os erros observados na medição do recalque. Tais erros são constatados ao se notar que os valores de recalque e deslocamento medidos às vezes diminuem ao longo do tempo.

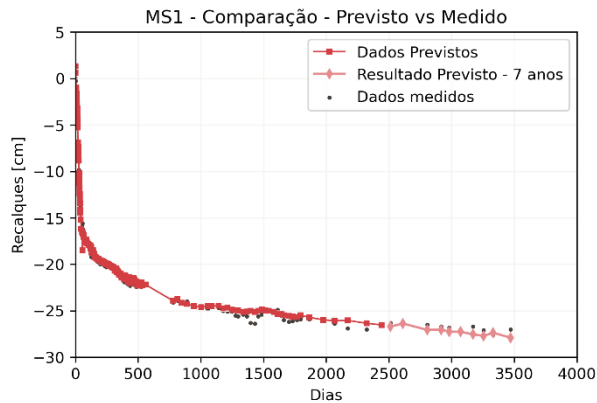
#### 4.3.3 Previsões na Barragem B

Assim como na Barragem A, para a Barragem B foram previstos os recalques e os deslocamentos horizontais. Em virtude do menor tempo de monitoramento da estrutura, as leituras futuras foram previstas para uma janela de tempo de 3 anos e não 7 anos como feito na Barragem A.

##### *Recalques*

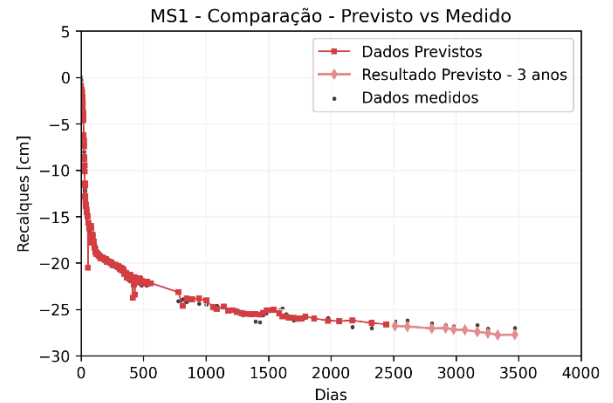
A previsão de recalques mostrou boa aproximação. Do Gráfico 27 ao Gráfico 30 Gráfico 28 são ilustradas as previsões considerando a utilização ou não de médias móveis como forma de suavização dos dados.

Gráfico 27 – Recalque - previsão de 3 anos – MS-1 – sem médias móveis



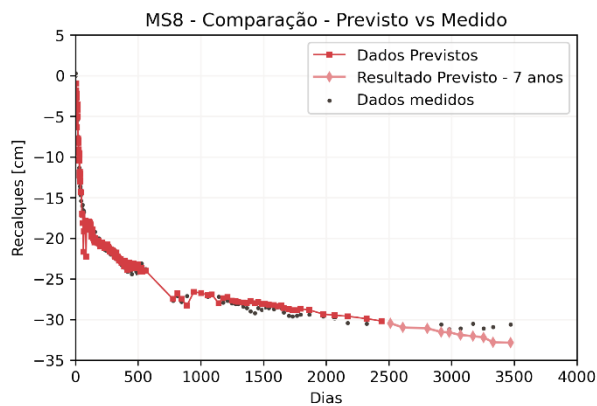
Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 28 – Recalque - previsão de 3 anos – MS-1 – com médias móveis (janela de 4 leituras)



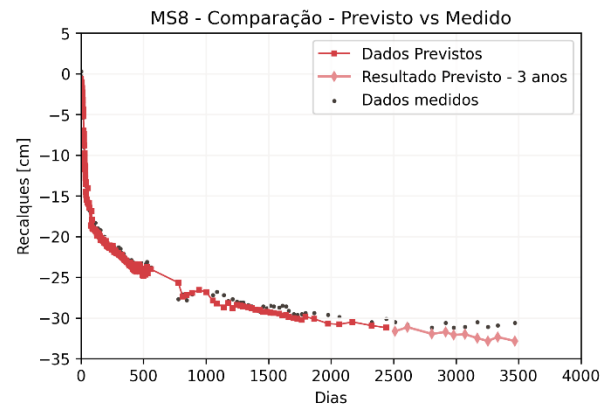
Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 29 – Recalque - previsão de 3 anos – MS-8 – sem médias móveis



Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 30 – Recalque - previsão de 3 anos – MS-8 – com médias móveis (janela de 4 leituras)



Fonte: do Autor (2021)

A Tabela 10 reúne as previsões feitas na Barragem B, considerando as mesmas métricas adotadas na Barragem A.

Tabela 10 - Resultado das previsões de recalque para a Barragem B (médias em cm)

Instrumento	Rede Neural	Real	Épocas	EMA	EMQ	Médias móveis
	Média (desvio padrão)	Média (desvio padrão)				
MS1	27,12 (0,58)	26,78 (0,44)	3000	0,5763	0,4448	Sim
MS2	18,93 (0,69)	17,98 (0,21)	3000	0,9417	1,4152	Não
MS3	11,04 (0,41)	9,96 (0,49)	1065	1,2023	2,1340	Não
MS4	Instrumento desconsiderado por problemas de leitura					
MS5	29,01 (0,92)	27,62 (0,31)	2380	1,1794	1,8133	Não
MS6	16,12 (0,7)	14,83 (0,31)	1387	1,3202	2,4716	Não
MS7	36,54 (0,72)	36,6 (0,32)	3000	1,4996	2,7484	Sim
MS8	31,41 (0,49)	30,88 (0,29)	3000	1,8068	3,3549	Sim

MS9	19,82 (0,43)	19,37 (0,4)	3000	0,6221	0,5660	Não
MS10	10,86 (1,57)	10,2 (0,43)	3000	1,6950	3,4071	Sim
MS11	35,29 (0,76)	35,06 (0,42)	3000	1,5331	3,0203	Sim
MS12	28,29 (0,68)	27,08 (0,29)	3000	0,5491	0,6590	Sim
MS13	17,98 (0,52)	17,37 (0,33)	3000	1,8246	3,3902	Sim
MS14	23,4 (0,65)	23,66 (0,38)	3000	0,7629	0,8147	Sim
MS15	10,08 (0,47)	9,71 (0,42)	3000	0,6429	0,6040	Sim

Fonte: Do autor (2021)

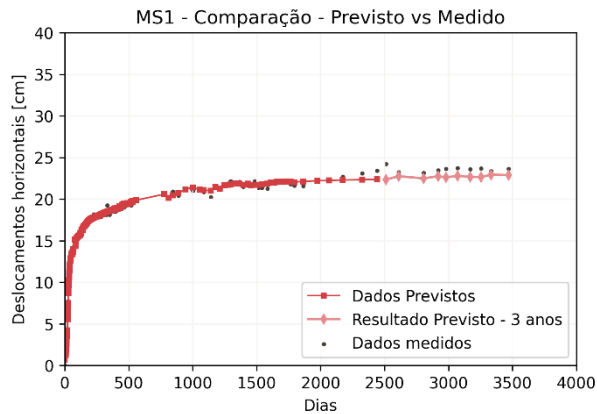
Observa-se que, de modo geral, a utilização das médias móveis, apesar de introduzir algum erro ao modelo nos anos iniciais, apresenta, para a maioria dos instrumentos, uma grande redução no erro de previsão. Para a Barragem B, a maioria dos instrumentos apresentou melhores resultados de previsão quando se considerava as médias móveis no conjunto de leituras.

A quantificação do erro para a Barragem B mostra que a média do EMA e o EMQ são de 1,15 e 1,92 cm, respectivamente. A ausência das variações do nível do reservatório introduziu um grau de aleatoriedade no conjunto de dados e aumentou o erro observado, o que mostra que, para uma melhor aproximação, os dados do nível do reservatório são necessários. Os poucos instrumentos que apresentaram EMA e EMQ abaixo de 1,0 cm, poderiam facilmente contar com a aproximação das suas leituras pelas RNAs, já os demais, necessitam de uma análise individual, para verificar qual o erro considerado aceitável.

#### *Deslocamentos*

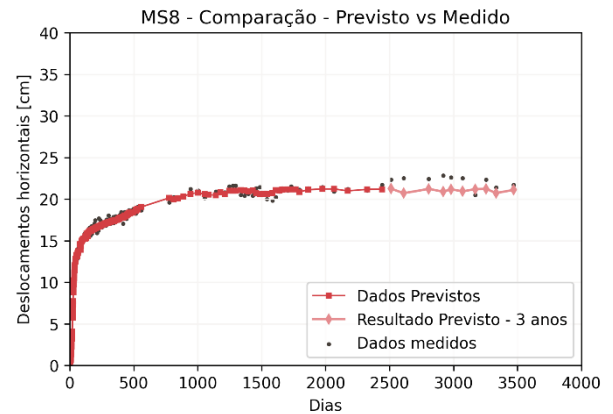
A previsão de deslocamentos para a Barragem B foi feita sem a consideração de médias móveis, assim como na Barragem A. O Gráfico 31 e o Gráfico 32 apresentam exemplos de previsões de deslocamento feitas nos instrumentos da Barragem B, representativas do que ocorre também para os outros instrumentos.

Gráfico 31 – Recalque - previsão de 3 anos – MS-1 –  
sem médias móveis



Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 32 – Recalque - previsão de 3 anos – MS-8 –  
sem médias móveis



Fonte: do Autor (2021)

Os resultados obtidos das previsões são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultado da previsão de deslocamentos para a Barragem B (médias em cm)

Instrumento	Rede Neural		Real	Épocas	EMA	EMQ
	Média (desvio padrão)	Média (desvio padrão)				
MS1	22,5 (0,27)	23,58 (0,32)	3000	1,0341	1,2466	
MS2	18,08 (0,39)	17,79 (0,42)	3000	0,571	0,6669	
MS3	14,78 (0,43)	14,27 (0,33)	3000	0,5684	0,6399	
MS4	Instrumento desconsiderado por problemas de leitura					
MS5	22,87 (0,45)	22,7 (0,43)	3000	0,6293	0,6018	
MS6	17,64 (0,11)	17,93 (0,44)	3000	0,3688	0,2139	
MS7	27,03 (0,29)	28,11 (0,65)	3000	1,0519	1,408	
MS8	22,9 (0,76)	22,17 (0,74)	3000	1,139	2,3259	
MS9	18,65 (0,5)	18,52 (0,54)	3000	0,5258	0,4015	
MS10	14,28 (0,1)	15,01 (0,45)	3000	0,7316	0,6877	
MS11	27,06 (0,99)	27,07 (0,67)	3000	0,7051	1,2874	
MS12	22,75 (0,64)	21,93 (0,28)	3000	0,9353	1,2823	
MS13	17,12 (0,13)	17,59 (0,36)	3000	0,5311	0,3488	
MS14	19,92 (0,96)	19,44 (0,65)	3000	0,6669	0,9074	
MS15	10,45 (0,08)	11 (0,38)	3000	0,5493	0,4133	

Fonte: Do autor (2021)

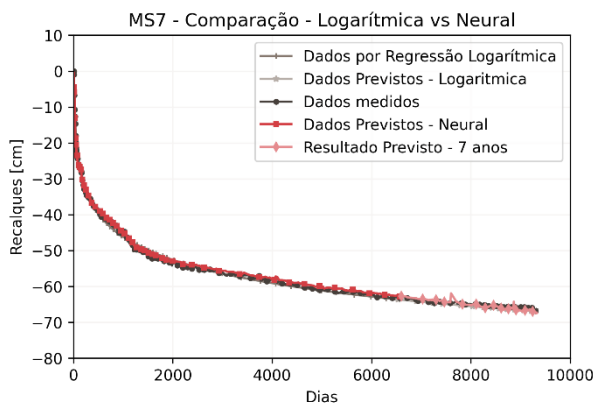
Observa-se que para os deslocamentos, as previsões apresentam erros menores do que os observados na previsão dos recalques. Tal fato foi observado e comentado também para a Barragem A. A previsão dos deslocamentos mostra que as médias do EMA e do EMQ são de 0,71 e 0,89 cm, respectivamente.

Outro fator a se ressaltar, além da ausência da variável “nível do reservatório”, é o fato de terem sido utilizados dados de temperatura da estação do INMET mais próxima da Barragem B, que não representa fielmente os dados do local, e constitui uma aproximação que pode ter impactos significativos. Mesmo com tal aproximação, as previsões feitas pela RNA estão próximas das leituras reais.

#### 4.4 REGRESSÃO E A REDE NEURAL

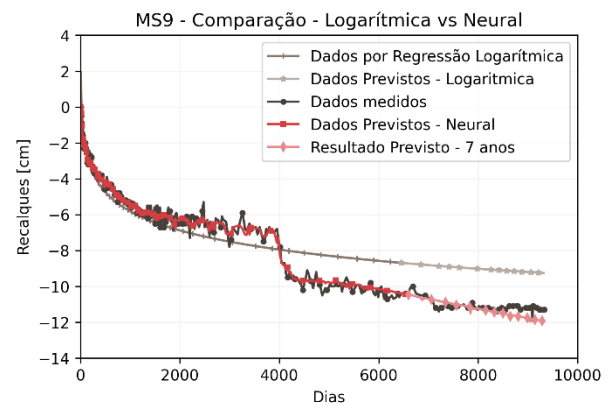
O desempenho da RNA precisa ser avaliado junto a alternativas mais simples. A regressão logarítmica é a regressão cuja função resultante possui forma mais semelhante ao conjunto de dados medidos pelos instrumentos e, por isso, foi a utilizada neste caso. O Gráfico 33 e o Gráfico 34 apresentam uma comparação das previsões feitas para os recalques dos marcos MS-7 e MS-9, da Barragem A, onde observa-se que para instrumentos com comportamento sem variações bruscas significativas ao longo dos anos de monitoramento, tanto a RNA quanto a regressão logarítmica apresentam boa aderência à série de dados, enquanto que nos outros casos o melhor desempenho é observado na RNA.

Gráfico 33 – Recalque - Comparação MS-7 – Regressão por logaritmo e por RNA



Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 34 – Recalque - Comparação MS-9 – Regressão por logaritmo e por RNA

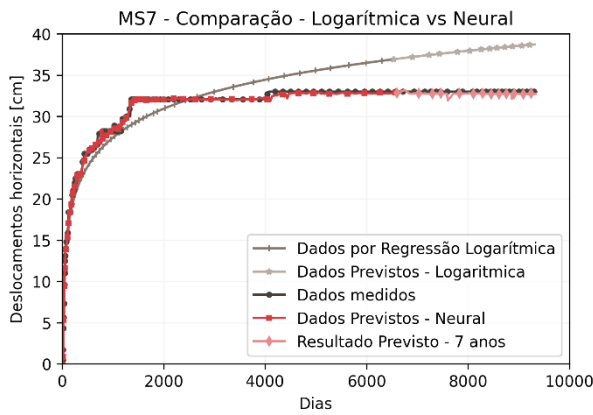


Fonte: do Autor (2021)

Para os mesmos instrumentos (MS-7 e MS-9), da mesma barragem, porém considerando o movimento de deslocamento horizontal, o resultado de previsão foi ainda melhor. O Gráfico 35 e o Gráfico 36 apresentam uma comparação feita entre as previsões das RNAs e as previsões feitas pela regressão logarítmica, onde é possível observar o melhor desempenho da RNA em detrimento da regressão logarítmica.

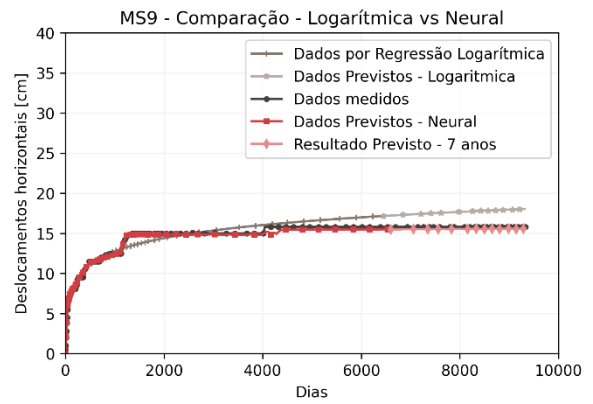


Gráfico 35 – Barragem A- Regressão logarítmica e por RNA – Deslocamento – MS7



Fonte: do Autor (2021)

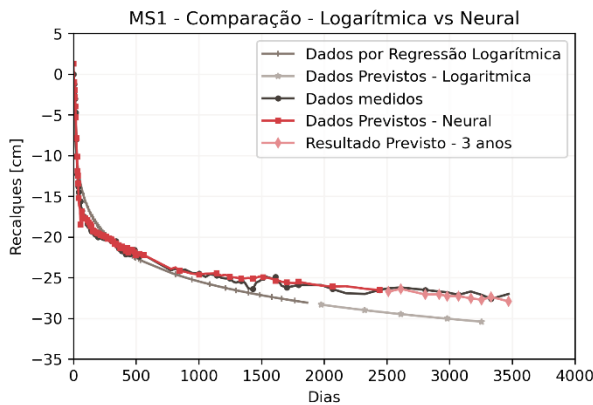
Gráfico 36 – Barragem A- Regressão logarítmica e por RNA – Deslocamento – MS9



Fonte: do Autor (2021)

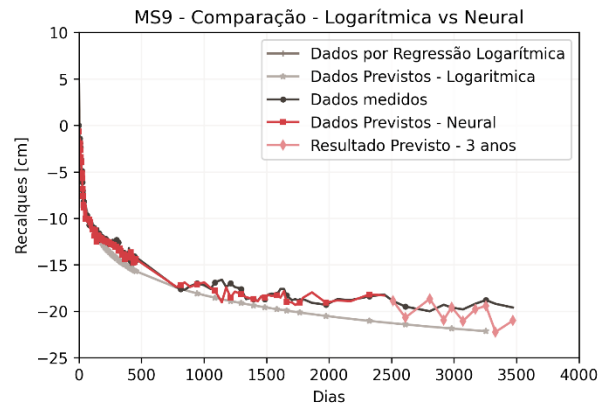
O mesmo comportamento é observado na Barragem B. Do Gráfico 37 ao Gráfico 40 são ilustradas as aproximações feitas pela RNA e pela regressão logarítmica para os movimentos de recalque e deslocamento horizontal.

Gráfico 37 – Barragem B – Regressão logarítmica e por RNA – Recalque – MS1



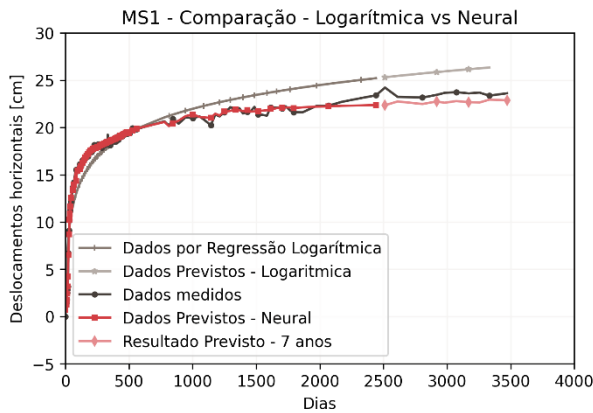
Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 38 – Barragem B – Regressão logarítmica e por RNA – Recalque – MS9



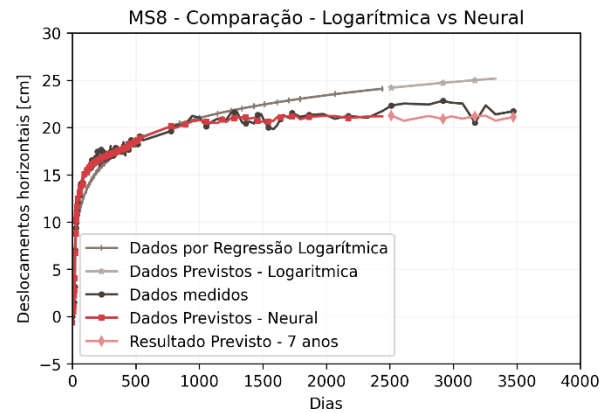
Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 39 – Barragem B – Regressão logarítmica e por RNA – Deslocamento – MS1



Fonte: do Autor (2021)

Gráfico 40 – Barragem B – Regressão logarítmica e por RNA – Deslocamento – MS8



Fonte: do Autor (2021)

Os resultados numéricos para a Barragem A e B são apresentados na Tabela 12. Os valores dizem respeito às leituras previstas e medidas dos últimos 7 anos para a Barragem A e dos últimos 3 anos para a Barragem B.

Tabela 12 – Resultado das previsões por regressão logarítmica e RNAs (Médias em cm)

Instrument o	Recalques			Deslocamento		
	Rede Neural	Regressão logarítmica	Dados reais	Rede Neural	Regressão logarítmica	Dados reais
	Média (desvio-padrão)			Média (desvio-padrão)		
<b>Barragem A</b>						
MS1	5,20 (0,21)	4,61 (0,05)	5,19 (0,36)	7,54 (0,04)	8,37 (0,10)	7,50 (0,00)
MS2	16,23 (0,30)	16,07 (0,20)	15,86 (0,22)	13,57 (0,11)	15,42 (0,18)	13,70 (0,00)
MS3	26,00 (0,50)	25,93 (0,34)	25,89 (0,51)	16,61 (0,03)	18,56 (0,24)	16,50 (0,00)
MS4	21,42 (0,54)	21,20 (0,27)	21,11 (0,43)	15,14 (0,02)	17,35 (0,21)	15,00 (0,00)
MS5	38,66 (0,96)	38,43 (0,50)	38,38 (0,68)	22,41 (0,08)	25,67 (0,34)	22,70 (0,00)
MS6	40,77 (0,21)	40,24 (0,52)	41,39 (0,56)	25,17 (0,07)	27,98 (0,37)	24,50 (0,01)
MS7	65,06 (1,38)	65,65 (0,91)	65,10 (0,87)	33,27 (0,25)	38,03 (0,50)	33,00 (0,03)
MS8	59,94 (0,34)	61,32 (0,50)	60,55 (0,64)	37,60 (0,18)	43,65 (0,62)	38,50 (0,00)
MS9	11,10 (0,25)	9,03 (0,15)	11,10 (0,30)	15,82 (0,04)	17,70 (0,24)	15,80 (0,00)
MS10	32,26 (0,34)	30,65 (0,50)	32,28 (0,38)	25,98 (0,05)	30,06 (0,42)	26,40 (0,00)
MS11	51,56 (0,80)	49,67 (1,04)	51,01 (0,75)	28,68 (0,10)	33,53 (0,59)	29,00 (0,00)
MS12	61,92 (1,16)	61,67 (0,91)	61,23 (0,78)	36,61 (0,21)	41,95 (0,64)	36,60 (0,00)
MS13	58,22 (0,61)	59,23 (1,08)	57,67 (0,66)	37,8 (0,12)	43,03 (0,81)	37,80 (0,00)
<b>Barragem B</b>						
MS1	26,59 (0,6)	29,59 (0,35)	26,78 (0,44)	22,5 (0,27)	25,85 (0,31)	23,58 (0,32)
MS2	18,93 (0,69)	19,46 (0,25)	17,98 (0,21)	18,08 (0,39)	19,13 (0,24)	17,79 (0,42)
MS3	11,04 (0,41)	10,11 (0,14)	9,96 (0,49)	14,78 (0,43)	15,17 (0,19)	14,27 (0,33)
MS5	29,01 (0,92)	29,12 (0,36)	27,62 (0,31)	22,87 (0,45)	25,05 (0,29)	22,7 (0,43)

MS6	16,12 (0,7)	15,41 (0,2)	14,83 (0,31)	17,64 (0,11)	19,98 (0,24)	17,93 (0,44)
MS7	36,54 (0,72)	39,87 (0,48)	36,6 (0,32)	27,03 (0,29)	30,82 (0,38)	28,11 (0,65)
MS8	31,41 (0,49)	32,66 (0,4)	30,88 (0,29)	22,9 (0,76)	24,71 (0,30)	22,17 (0,74)
MS9	19,82 (0,43)	20,12 (0,25)	19,37 (0,4)	18,65 (0,5)	20,51 (0,25)	18,52 (0,54)
MS10	10,86 (1,57)	9,57 (0,14)	10,2 (0,43)	14,28 (0,1)	16,26 (0,21)	15,01 (0,45)
MS11	35,29 (0,76)	38,48 (0,47)	35,06 (0,42)	27,06 (0,99)	29,43 (0,36)	27,07 (0,67)
MS12	28,29 (0,68)	28,58 (0,35)	27,08 (0,29)	22,75 (0,64)	24,24 (0,28)	21,93 (0,28)
MS13	17,98 (0,52)	17,27 (0,23)	17,37 (0,33)	17,12 (0,13)	19,57 (0,23)	17,59 (0,36)
MS14	23,4 (0,65)	25,85 (0,32)	23,66 (0,38)	19,92 (0,96)	21,66 (0,25)	19,44 (0,65)
MS15	10,08 (0,47)	10,08 (0,13)	9,71 (0,42)	10,45 (0,08)	11,35 (0,14)	11,00 (0,38)

Fonte: Do autor (2021)

Com o intuito de comparar os intervalos previstos para os instrumentos, foram adotadas duas métricas baseadas no erro médio quadrático:

- A primeira métrica consiste em avaliar o erro quadrático médio de todos os dados previsto pela rede, incluindo as previsões futuras e as previsões intermediárias em relação aos dados medidos.
- A segunda métrica consiste em avaliar o erro quadrático médio apenas das previsões em relação às medições.

O objetivo da primeira métrica é avaliar o desempenho geral do modelo. A segunda métrica, por outro lado, avalia diretamente a capacidade da RNA em prever leituras futuras. O erro quadrático médio foi escolhido por ser sensível a erros discrepantes, visto que, cada diferença entre valor medido e previsto é elevada ao quadrado, o que beneficia leituras próximas (diferenças menores que 1 cm) e penaliza leituras distantes (diferenças maiores que 1 cm). Os resultados obtidos através da aplicação de tais métricas estão dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 – Quantificação do erro - Rede Neural e regressão logarítmica

Instrumentos	Recalque				Deslocamentos			
	Rede Neural		Regressão logarítmica		Rede Neural		Regressão logarítmica	
	EMQ Geral	EMQ das Previsões	EMQ Geral	EMQ das Previsões	EMQ Geral	EMQ das Previsões	EMQ Geral	EMQ das Previsões
	Barragem A							
MS1	0,1533	0,0700	0,1799	0,4598	0,0521	0,0036	0,3087	0,7631
MS2	0,0641	0,1440	0,2918	0,0587	0,0675	0,0301	1,3890	2,9755
MS3	0,0710	0,1043	0,6052	0,0732	0,0628	0,0125	1,6614	4,3098
MS4	0,1805	0,2143	0,7998	0,0760	0,0638	0,0214	2,1173	5,5808
MS5	0,2760	0,2994	1,1868	0,0905	0,0560	0,0878	3,0306	8,9566
MS6	0,5769	0,5631	1,9497	1,5098	0,1240	0,0206	4,2201	12,2429
MS7	0,7111	0,4195	1,0321	0,3170	0,1787	0,0715	8,8164	25,4881
MS8	0,5325	0,5169	1,2413	0,6383	0,3283	0,0842	8,3190	26,7810

Instrumentos	Recalque				Deslocamentos			
	Rede Neural		Regressão logarítmica		Rede Neural		Regressão logarítmica	
	EMQ Geral	EMQ das Previsões	EMQ Geral	EMQ das Previsões	EMQ Geral	EMQ das Previsões	EMQ Geral	EMQ das Previsões
Barragem A								
MS9	0,0835	0,0596	1,4486	4,4549	0,0258	0,0018	1,2170	3,6282
MS10	0,2129	0,0588	2,3131	2,8845	0,2850	0,1775	4,5294	13,4680
MS11	0,5505	0,3089	4,5917	3,5037	0,4818	0,0575	6,6176	19,8488
MS12	0,4314	0,6744	1,4265	0,2727	0,3493	0,0446	10,9068	29,0621
MS13	0,3354	0,1506	1,2448	1,7126	0,3833	0,0474	9,2230	26,8001
Média	0,3215	0,2757	1,4086	1,2348	0,1891	0,0508	4,7966	13,8388
Barragem B								
MS1	0,8570	1,1986	22,6629	20,8285	0,2788	0,1736	2,7529	5,1302
MS2	0,3341	0,3259	5,9896	18,4820	0,1979	0,0801	1,0942	1,9623
MS3	0,2939	0,4046	0,4960	12,7667	0,1993	0,0737	0,5729	0,8231
MS4	Instrumento desconsiderado por problemas com as leituras							
MS5	0,3264	0,2020	11,7602	51,6438	0,3263	0,1789	2,5835	5,6015
MS6	0,3967	0,5941	1,5417	21,4529	0,2173	0,0791	1,3576	4,1943
MS7	0,6462	1,0242	38,9585	50,2629	0,5488	0,6867	5,3240	7,3230
MS8	0,6026	1,5083	14,3838	63,2531	0,5834	0,9302	2,8925	7,0885
MS9	0,3126	0,2581	1,7865	46,5262	0,4045	0,3380	2,1039	3,7029
MS10	0,3468	0,2786	0,4539	22,6760	0,4212	0,3937	0,6747	1,4184
MS11	0,5710	0,8761	33,6140	48,0003	0,6511	0,8987	5,5324	6,1252
MS12	0,4708	0,4312	10,2257	50,9608	0,4349	0,5391	3,7450	5,2449
MS13	0,5403	0,8012	1,2576	38,4507	0,4314	0,5940	1,7043	4,0037
MS14	0,5699	0,7281	18,7277	20,1961	0,4502	0,3718	4,1117	5,4267
MS15	0,4294	0,3627	3,2390	5,8764	0,4212	0,4136	1,4591	0,3099
Média	0,4784	0,6424	11,7927	33,6698	0,3976	0,4108	2,5649	4,1682

Fonte: Do autor (2021)

A RNA possui desempenho superior à regressão logarítmica tanto na generalização da série histórica quanto na previsão de leituras futuras para mais de 80% dos instrumentos da Barragem A e mais de 95% dos instrumentos da Barragem B, considerando-se recalque e deslocamentos. A regressão logarítmica mostra-se viável apenas quando não existem variações brusca de leitura ou mudanças de comportamento ao longo da série histórica dos instrumentos, enquanto a RNA se adaptou a todas as situações.

#### 4.5 PROPOSTA PARA A DEFINIÇÃO DE VALORES DE REFERÊNCIA DOS MARCOS SUPERFICIAIS

Determinar o que é um nível de atenção, alerta ou emergência para um deslocamento ou recalque em uma BEFC envolve conhecer e conseguir determinar os mecanismos que indicam um processo de potencial instabilização ou ruptura. Um nível de emergência poderia estar associado à iminência de um galgamento (para marcos de crista), por exemplo. No entanto, restariam os demais instrumentos, bem como os níveis de alerta e atenção que precisariam ser associados a outros fenômenos ou eventos. Não havendo registros históricos de rupturas suficientes para permitir a análise, justifica-se a determinação de valores de referência únicos e não três níveis de controle para estes instrumentos.

Além disso, conforme supracitado, na prática atual estes valores são definidos com base em modelos numéricos, calibrados com leituras de deformação, e que normalmente apresentam excelentes resultados para os primeiros anos de operação, mas que não atendem a necessidade do monitoramento a longo prazo. Outras práticas são adotadas no meio técnico, como a definição de valores de controle com base nas máximas deformações específicas, no entanto, este critério necessita de revisões contínuas, visto que, as barragens existentes podem alcançar recalques específicos maiores sem apresentar problemas que gerem algum tipo de alerta.

Ainda, há de se ressaltar que as definições de valores de controle comumente empregadas, utilizando artifícios estatísticos, podem representar bem alguns casos em específico, a exemplo do ocorrido neste trabalho com a regressão logarítmica, mas não apresentam bons resultados para todos os instrumentos. Essa situação, bem como as demais situações expostas anteriormente, mostram a necessidade de se encontrar uma forma alternativa de definir estes valores, que possa complementar ou substituir as abordagens utilizadas atualmente. Nesse caso, as RNAs podem desempenhar tal função, pois são capazes de abstrair os dados de leitura e aprender com variáveis associadas aos fenômenos observados e que são de simples mensuração, como as escolhidas neste trabalho.

A seção a seguir discorre sobre uma forma de se realizar a determinação do valor de referência para os marcos superficiais, tendo em vista as previsões obtidas a partir das RNAs.

#### 4.5.1 Determinação: análise do pior cenário

As análises do melhor e pior cenário são comuns em problemas de engenharia. Os melhores e piores cenários de previsão podem ser avaliados aplicando-se máximos e mínimos a intervalos de dados, semelhante ao que o método das médias móveis faz, mas substituindo a média pelas funções máximo e mínimo, respectivamente. Tal consideração faz com que a RNA aprenda as leituras extremas do histórico como sendo as leituras do instrumento, o que permite tentar prever o melhor e o pior cenário de medidas futuras. O pior valor pode ser adotado como o maior recalque esperado, ou seja, ser adotado como valor de referência, visto que o aprendizado é dado sobre o histórico de leituras e este valor consegue englobar desvios de leitura.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Definição de valores de referência				
Instrumento	Recalque		Deslocamento	
	Valor de referência	Última leitura	Valor de referência	Última leitura
Barragem A				
MS1	5,79	5,70	7,85	7,50
MS2	16,83	16,50	14,54	13,70
MS3	28,35	27,10	16,58	16,50
MS4	22,36	21,70	15,32	15,20
MS5	41,09	40,75	23,29	22,70
MS6	42,58	42,10	24,58	24,60
MS7	67,72	66,40	33,85	33,30
MS8	62,83	61,30	38,70	38,50
MS9	11,77	11,30	15,81	15,80
MS10	33,82	33,00	26,55	26,40
MS11	54,01	51,80	29,64	29,00
MS12	64,81	62,90	36,79	36,60
MS13	60,06	58,60	38,58	38,50
Barragem B				
MS1	28,91	27,60	25,22	24,22
MS2	19,41	18,30	19,10	18,51
MS3	11,37	10,60	15,21	14,72
MS5	29,23	28,20	23,43	23,32
MS6	16,79	15,30	18,69	18,49
MS7	38,37	37,00	29,41	29,07
MS8	32,46	31,20	23,27	22,83
MS9	19,78	20,00	20,32	19,21
MS10	11,45	10,90	15,74	15,58
MS11	35,70	35,50	28,76	28,07

MS12	28,15	27,70	22,82	22,36
MS13	19,23	17,70	19,07	18,20
MS14	25,59	24,20	20,33	20,31
MS15	10,77	10,20	12,52	11,48

Fonte: Do autor (2021)

Os resultados obtidos mostram que é possível utilizar as RNAs para se definir valores de referência para monitoramento, usando as previsões futuras dadas pelo modelo. Para todos os instrumentos, o valor previsto garantiu que as leituras estivessem abaixo do valor de referência. Como são produzidos resultados diferentes cada vez que o modelo é treinado, deve-se realizar ao menos 5 tentativas e adotar o menor valor obtido, ou o segundo menor valor obtido, pois isso evita que sejam definidos valores de referência muito esparsos e distantes do conjunto de leituras.

## 5 CONCLUSÕES

Os casos aqui estudados indicam que a previsão de leituras futuras de deslocamentos verticais e horizontais em BEFCs utilizando as RNAs leva a bons resultados sempre que se dispõe de um bom conjunto de leituras. Entre os deslocamentos verticais e horizontais, os horizontais foram os previstos com maior precisão. Em comparação com um método de regressão convencional, as RNAs obtiveram desempenho superior para praticamente todos os casos, o que as credencia como uma boa solução para a obtenção de previsão de leituras.

Notou-se que, como cada instrumento de medição pode levar a conjuntos de dados relativamente diferentes, a construção das redes neurais artificiais deve levar em consideração as características individuais de cada instrumento no intuito de aumentar a precisão das previsões obtidas.

Durante a realização dos testes, verificou-se que há sempre a necessidade de monitorar a perda de qualidade do treinamento com o passar das épocas para cada instrumento, verificando quando é necessário parar para evitar um sobreajuste nos dados, modificando o critério de parada antecipada se necessário.

Ademais, a definição de valores de referência considerando as previsões feitas pela RNA forneceu valores maiores (em no máximo 2cm) ou muito próximos à última leitura feita. Dessa forma, a abordagem sugerida neste trabalho pode preencher uma lacuna no meio técnico, visto que, os métodos existentes e que se baseiam em recalques específicos máximos apresentam bons resultados, porém, não utilizam características do comportamento do empreendimento e muitas vezes são facilmente ultrapassados.

### 5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Tendo em vista os resultados obtidos e discutidos, para pesquisas futuras sugere-se:

- A tentativa de utilização de outras variáveis que estejam associadas ao recalque e que consigam considerar fatores como a altura dos empreendimentos, a forma do vale e parâmetros de deformabilidade do enrocamento e da fundação, visto que o resultado de previsão do recalque pode ser melhorado.
- Estudo de outros instrumentos de medição de deslocamentos e deformações, como extensômetros e células hidráulicas de recalque.
- Avaliação de outras grandezas, como a vazão, por exemplo;



## REFERÊNCIAS

ACOSTA-GONZÁLEZ, Luis E. *et al.* **Displacements Study of an Earth Fill Dam Based on High Precision Geodetic Monitoring and Numerical Modeling.** Abril, 2018. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/324812005\\_Displacements\\_Study\\_of\\_an\\_Earth\\_Fill\\_Dam\\_Based\\_on\\_High\\_Precision\\_Geodetic\\_Monitoring\\_and\\_Numerical\\_Modeling](https://www.researchgate.net/publication/324812005_Displacements_Study_of_an_Earth_Fill_Dam_Based_on_High_Precision_Geodetic_Monitoring_and_Numerical_Modeling)>. Acesso em: 13 fev. 2021.

BORDEAUX, Guy H. R. M. **Projeto e construção de Barragens de Terra e Enrocamento I.** Rio de Janeiro: Editora Internacional Engenharia S.A., 1979. 300p.

BRASIL. **Lei 12.334/2010 alterada pela Lei 14.066/2020.** Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm). Acesso em 12 de junho 2021.

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto.** São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

CRUZ, Paulo Teixeira da *et al.* **Barragens de enrocamento com face de concreto.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 359 p.

COOKE, James B.; SHERARD, James L. **Concrete-Face Rockfill Dam: II. Design.** Journal of Geotechnical Engineering Vol. 113, Issue 10, October 1987

DUNNICLIFF, John. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance.** EUA: John Wiley & Sons, 1988.

DUCHI, John *et al.* **Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization.** The Journal of Machine Learning Research, 12:2121–2159, 2011

ELETROBRÁS. **Critério de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas.** 2003. Disponível em <<https://eletrobras.com/>>. Acesso em 29 mai. 2021.

FELL, Robin *et al.* **Geotechnical Engineering of Dams**. 2 ed. Londres: CRC Press, 2015.

FENG, Shan *et al.* **Design and performance of the Quxue asphalt-core rockfill dam**. *Soils and Foundation* 60, 2020. p. 1036-1049

FUSARO, Teresa Cristina. **Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau**. 2007. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. Disponível em <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3400>. Acesso em 01 abril 2021

GHODRATI, Ahmadreza; ARAEI, Ata Aghaei. **Artificial Neural Networks for Modeling Shear Modulus and Damping Behavior of Gravelly Materials**. *Internal Journal of Geomechanics*, Volume 17 – Issue 2, 2017.

GOURINE, Bachir; KHELIFA, Sofiane. **Analysis of Dam Deformation Using Artificial Neural Networks Methods and Singular Spectrum Analysis**. Disponível em <[https://www.researchgate.net/publication/321778111\\_Analysis\\_of\\_Dam\\_Deformation\\_Using\\_Artificial\\_Neural\\_Networks\\_Methods\\_and\\_Singular\\_Spectrum\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/321778111_Analysis_of_Dam_Deformation_Using_Artificial_Neural_Networks_Methods_and_Singular_Spectrum_Analysis)>. Acesso em 29 mai. 2021.

HAN, Bo *et al.* **Statistically Optimized Back-Propagation Neural-Network Model and Its Application for Deformation Monitoring and Prediction of Concrete-Face Rockfill Dams**. *Journal of Performance of Constructed Facilities* - Volume 34, Issue 4. 2020.

HAYKIN, Simon. **Neural Networks: A Comprehensive Foundation**. 2 ed. India: Pearson Education, 1999. 823 p.

HORNIK, K. *et al.* (1989). **Multilayer feedforward networks are universal approximators**. *Neural Networks* - Volume 2, Issue 5, p.359–366.

KERAS API. **Documentação da API Keras para Machine Learning**. Disponível em: <https://keras.io/api/>. Acesso em 20 ago. 2021.

KIM, Yong-Seong; KIM, Byung-Tak; **Prediction of relative crest settlement of concrete-faced rockfill dams analyzed using an artificial neural network model.** Computers and Geotechnics 35, 2008, p.313-322

KINGMA, D. P.; BA, J. L.; **ADAM: A Method for Stochastic Optimization.** Proceedings of the Third International Conference on Learning Representations, San Diego, CA, May 7–9, 2015.

LARRAHONDO, J. M. *et al.* **Long-Term Behavior of a Rockfill Dam: La Esmeralda Dam, Colombia.** Proceedings of the Geo-Congress 2014: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability. GSP 234. Atlanta, GA-USA, February 2014. pp. 237-251.

PANDAS LIBRARY. Documentação da Biblioteca Python Pandas. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/docs/>. Acesso em 21 ago. 2021.

PAUSZ, Sebastian *et al.* **Design Considerations of Concrete Face Rockfill Dam with a High Cut-off Wall and Located on a Thick Alluvial Soil Layer.** TRCOLD 2016: 10th ICOLD European Club Meeting. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/330411302\\_Design\\_considerations\\_of\\_Concrete\\_Face\\_Rockfill\\_Dam\\_with\\_a\\_high\\_cut-off\\_wall](https://www.researchgate.net/publication/330411302_Design_considerations_of_Concrete_Face_Rockfill_Dam_with_a_high_cut-off_wall). Acesso em 20 de jun. 2021

PEREIRA, Geraldo M. **Acidentes e rupturas de barragens de armazenamento de água.** São Paulo: ABGE, 2020.

PHAM, Tuan Ahn *et al.* **Design deep neural network architecture using a genetic algorithm for estimation of pile bearing capacity.** PLOS ONE, Dezembro, 2020. Disponível em <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0243030>. Acesso em 28 de Agosto de 2021.

SEO, Min-Woo *et al.* **Behavior of Concrete-Faced Rockfill Dams during Initial Impoundment.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135, 2009. p. 1070-1081

SILVA, Ivan Nunes da; SPATTI, Danilo Hernane; FLAUZINO, Rogério Andrade. **Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas: fundamentos teóricos e aspectos práticos**. 2ª ed. São Paulo: Artliber, 2010.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Deformações e deslocamentos em maciços de barragem**. VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Olinda, 1982.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 413p.

TAYFUR, Gokmen *et al.* (2005). **Case Study: Finite Element Method and Artificial Neural Network Models for Flow through Jeziorsko Earthfill Dam in Poland**. *Journal of Hydraulic Engineering* 131, 2005, p.431-440.

TIELEMAN, T.; HINTON, G.; **Lecture 6.5 – RMSProp – COURSERA: Neural Networks for Machine Learning**. Technical Report, 2012.

TWOMEY, J.; SMITH, A. **Performance measures, consistency, and power for artificial neural network models**. *Mathematical and Computer Modelling*, Volume 21, Issues 1-2, Janeiro, 1995.

United States Army Corps of Engineers (USACE). **INSTRUMENTATION OF EMBANKMENT DAMS AND LEVEES (Manual 1110-2-1908)**. Washington: 2020. Disponível em [https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Users/182/86/2486/EM%201110-2-1908.pdf?ver=SZ5K1AeyStmXACafxcvJ\\_g%3d%3d](https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Users/182/86/2486/EM%201110-2-1908.pdf?ver=SZ5K1AeyStmXACafxcvJ_g%3d%3d). Acesso em 23 mai. 2021.

United States Department of Interior - Bureau of Reclamation (USBR). **Dams And Public Safety**. Denver, 1983. Disponível em: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/mands-pdfs/AZ1130.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2021.

WU, Yongkang *et al.* (2014). **Displacement-Based Back-Analysis of the Model Parameters of the Nuozhadu High Earth-Rockfill Dam.** Disponível em <[https://www.researchgate.net/publication/264797844\\_Displacement-Based\\_Back-Analysis\\_of\\_the\\_Model\\_Parameters\\_of\\_the\\_Nuozhadu\\_High\\_Earth-Rockfill\\_Dam](https://www.researchgate.net/publication/264797844_Displacement-Based_Back-Analysis_of_the_Model_Parameters_of_the_Nuozhadu_High_Earth-Rockfill_Dam)>. Acesso em 29 mai. 2021

ZEILER, Matthew D.; **ADADELTA: AN ADAPTIVE LEARNING RATE METHOD.** Cornell University, 2012. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1212.5701>. Acesso em 20 ago. 2021.

ZHANG, L. M.; CHEN, Q. **Seepage Failure Mechanism of the Gouhou Rockfill Dam During Reservoir Water Infiltration.** Soils and Foundations 46, Issue 5, 2006. p.557-568

ZHOU, Wei *et al.* **Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam.** Computers and Geotechnics 38, 2011. p. 269-280