

Comportamento da Parede Diafragma Plástica da UHE Estreito Após 5 Anos de Execução

Cesar Schmidt Godoi, Eng. M.Sc.

Leme Engenharia, Florianópolis, Brasil, cesar.godoi@leme.com.br

Karina Guimarães Lopes Sola, Eng^a

Leme Engenharia, Florianópolis, Brasil, karina.lopes@leme.com.br

Márcia Collares Meirelles, Eng^a. M.Sc.

Leme Engenharia, Florianópolis, Brasil, marcia.meirelles@leme.com.br

Juliana Francisca Corrêa, Eng^a. M.Sc.

Leme Engenharia, Florianópolis, Brasil, juliana.correa@leme.com.br

RESUMO: Fundações de Barragens assentes em materiais de elevada permeabilidade sempre são pontos de preocupação em obras geotécnicas. A continuidade de monitoramento geotécnico e civil, de forma a avaliar o comportamento dessas estruturas deve ser tratada como princípios fundamentais na operação de uma Barragem. Esse trabalho apresenta a análise do comportamento geotécnico da parede diafragma plástica da UHE Estreito, localizada no rio Tocantins na divisa dos estados do Maranhão e Tocantins. A fundação da Barragem Principal da UHE Estreito apresenta uma espessa camada de aluvião assente sobre o maciço rochoso arenítico altamente friável, com elevada permeabilidade. Tendo em vista as características inerentes do maciço e da fundação, além da complexidade geológico-geotécnica, foram realizados tratamentos da fundação da Barragem através da execução de uma parede diafragma plástica utilizando o equipamento Hidrofresa. Na época, foi a primeira vez em que esse equipamento foi utilizado no Brasil, sendo que o mesmo apresenta algumas vantagens, sobretudo em relação à velocidade de execução. A parede diafragma está situada nas proximidades do pé do talude de montante abaixo de um tapete impermeabilizante, o qual liga o aterro do corpo da Barragem ao aterro da enscadeira de montante, sendo monitorada por meio de piezômetros elétricos do tipo corda vibrante, instalados tanto a montante, quanto a jusante da Parede Diafragma. Esses instrumentos indicam um comportamento de estabilidade, com perda de carga no sentido montante-jusante de aproximadamente 13 metros. Os piezômetros instalados a jusante da parede diafragma apresentam o comportamento vinculado às variações do nível de jusante. Outro ponto a se destacar se refere ao padrão de comportamento dos resultados dos instrumentos elétricos, que mesmo 5 anos após a instalação, apresentam comportamento adequado e coerente. Em alguns casos, devido ao tempo de operação, instrumentos elétricos podem já estar danificados, fato que não ocorre na UHE Estreito. A continuidade do monitoramento desses instrumentos, aliados à análise dos demais instrumentos da Barragem, e sobretudo, da realização de inspeções visuais com frequência adequada às características geológico-geotécnica da Barragem, são fatores fundamentais para possibilitar conclusões sobre a segurança da Estrutura da Barragem.

PALAVRAS-CHAVE: Parede Diafragma, Fundações de Barragens, Arenito, Monitoramento, Hidrofresa, Segurança de Barragens

1 INTRODUÇÃO

A UHE Estreito localiza-se no Rio Tocantins, fazendo divisa com os estados do Tocantins e Maranhão, nos municípios de Estreito (MA), Aguiarnópolis (TO) e Palmeiras do Tocantins (TO), a cerca de 130 km da cidade de Imperatriz (MA). O enchimento do reservatório da UHE Estreito começou em outubro de 2010, e foi feito por etapas. Em meados de maio de 2011 o nível do reservatório se aproximou da elevação 156,00 m (nível máximo normal).

Estreito é uma usina hidrelétrica com 08

(oito) unidades geradoras, com capacidade nominal unitária de 135,87 MW e capacidade instalada total de 1.087 MW. O arranjo compreende as estruturas de concreto da Tomada d'Água / Casa de Força e Vertedouro, complementado por barramentos em aterro no Leito do Rio e na Margem Esquerda. O comprimento total da crista do barramento, incluindo as estruturas de concreto, é de aproximadamente 1.300 m. A Figura 1 apresenta um arranjo geral da UHE Estreito, com a identificação das principais estruturas e da Parede Diafragma.

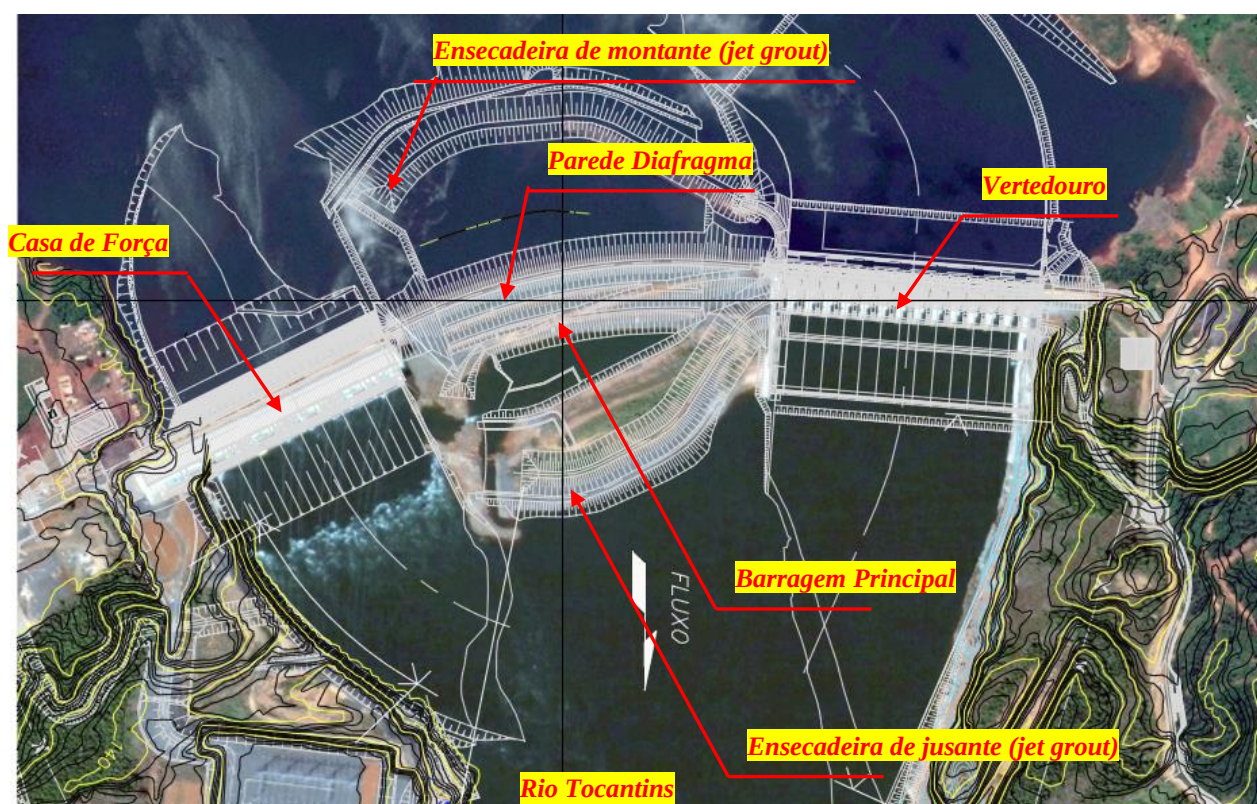


Figura 1. Arranjo Geral da UHE Estreito

A Barragem Principal é de Terra, composta por argila e areia, filtro vertical e tapete drenante. A altura máxima é de 42,5 metros, com crista de largura 8 metros e taludes de montante e jusante de 1V:2H.

O maciço de fundação da Barragem é composto por arenito, formação eólica, com coeficiente de permeabilidade na faixa de variação entre 10^{-4} a 10^{-2} cm/s, friável, não injetável. Determinado trecho da fundação encontra-se com uma espessa camada de aluvião (espessura máxima de 40 metros).

Tendo em vista as peculiaridades geológico-geotécnicas, sobretudo a extensa camada de aluvião foi necessária a realização de Projeto e Execução de uma parede diafragma plástica, executada com o uso de equipamento do tipo hidrofresa. A utilização da hidrofresa fez-se necessária também devido à rapidez da execução da mesma, possibilitando atender o cronograma existente na época, sendo uma técnica pioneira no Brasil. A Figura 2 apresenta uma seção típica da Barragem de Terra e seus principais materiais.

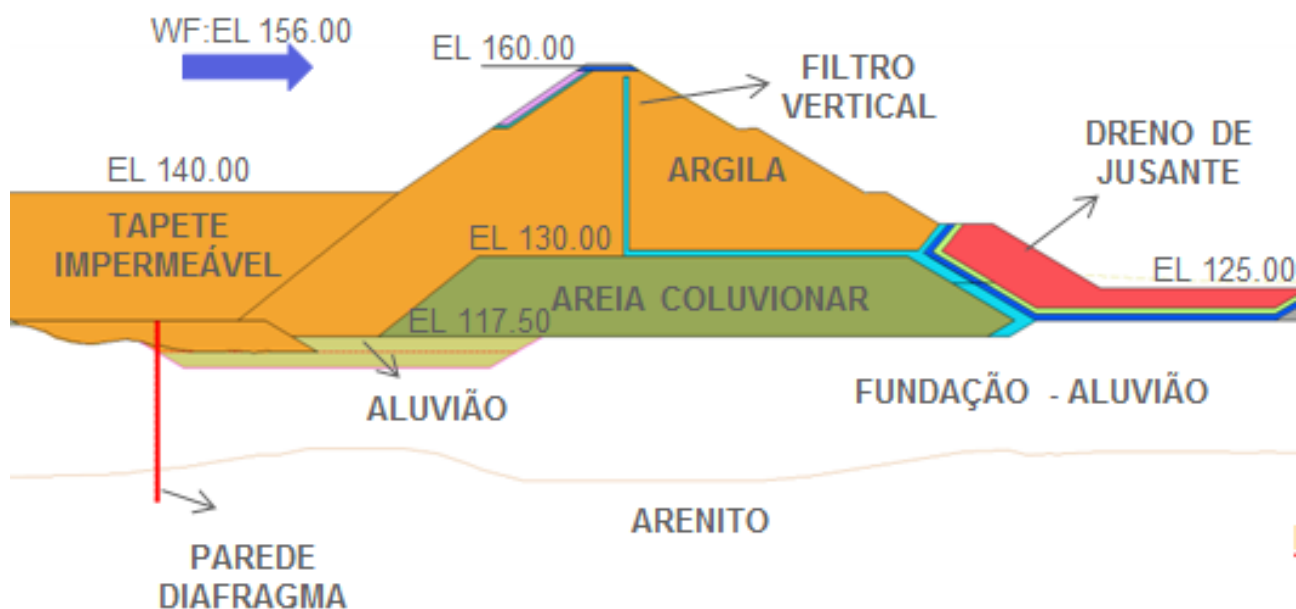


Figura 2. Seção Típica da Barragem de Terra com identificação da parede diafragma plástica (modificado de Azeredo et al. 2011)

2 DESCRIÇÃO DA PAREDE DIAFRAGMA

2.1 Características

A parede diafragma foi construída para funcionar como um elemento de vedação da região mais permeável da fundação, ou seja, o aluvião e a porção mais friável do arenito. Sua construção iniciou-se em 04 de junho de 2010 e seu término ocorreu em 28 de julho de 2010.

Azeredo et al (2011), apresentam detalhes e informações acerca do método executivo e desempenho na fase inicial de operação da Parede Diafragma. Na sequência alguns dos itens abordados naquele trabalho em relação aos aspectos executivos, estão descritos. O projeto da parede diafragma com preenchimento de coulis foi desenvolvido pelo consórcio Projetista (Intertechne/CNEC), originalmente composto por 77 lamelas de 2,50m de largura cada, com espessura de 0,80m, sobrepasso entre as mesmas de 25cm, perfazendo uma extensão total de 173,50m.

As duas máquinas de Hidrofresa, disponibilizadas pela Brasfond (contratada para execução do serviço), possuíam aberturas de escavação diferente dos 2,50m proposto em Projeto. Devido a esse fato, ocorreu a

readequação da disposição das escavações, ainda mantendo o sobrepasso de 25 cm, sendo que algumas das lamelas passaram a ter o sobrepasso de 40 cm. A configuração final da parede diafragma, apresentou um comprimento total de 174,10m.

Os principais equipamentos utilizados foram:

- Central de separação, uma para cada hidrofresa;
- Clamshell – GB 34;
- Hidrofresa – BG 40 Bauer – abertura de 2,80m;
- Hidrofresa – FD 60 Casagrande – abertura de 3,15m;

O coulis utilizado foi basicamente uma mistura de água:cimento:bentonita. Para a parede diafragma da UHE Estreito utilizou-se a composição expressa na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do coulis utilizado na parede diafragma

Composição	Quantidade
Cimento (CPII-32)	35 kg/m ³
Bentonita (Permagel sódica)	5 kg/m ³
Água	80 l/m ³
Fator água/cimento	2,28/1

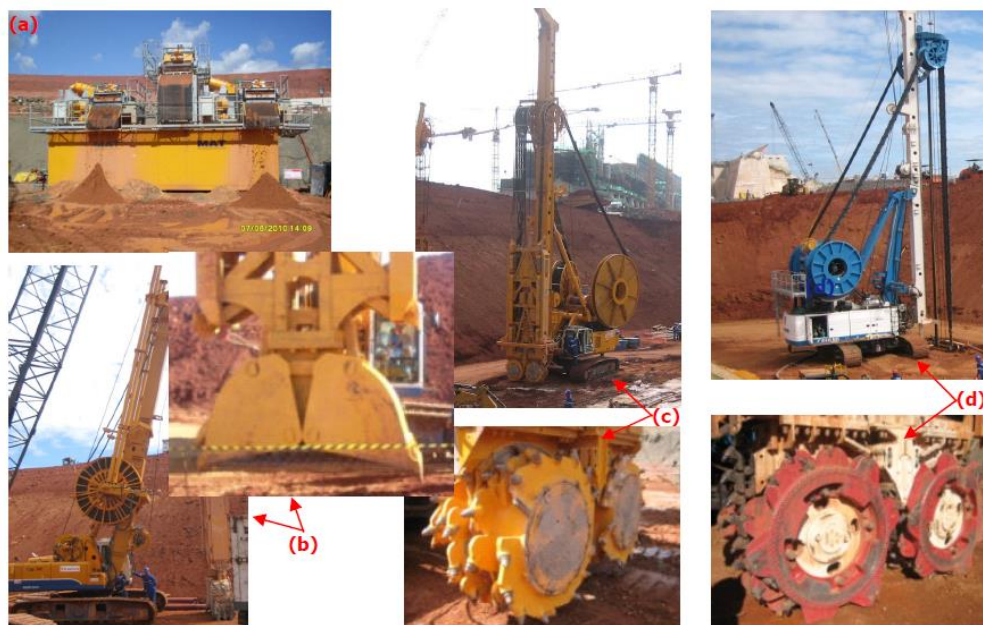


Figura 3. Equipamentos utilizados na execução da parede diafragma da UHE Estreito (a – Central de Separação; b – Clamshell – GB 34; c - Hidrofresa – BG 40 Bauer – abertura de 2,80m; d - Hidrofresa – FD 60 Casagrande – abertura de 3,15m) – Modificado de Leme (2010)

2.2 Instrumentos Instalados

Na região da parede diafragma encontram-se instalados 6 piezômetros elétricos, denominados de PE-PD01 ao PE-PD06, distribuídos conforme a Tabela 2. Esses instrumentos estão instalados em uma seção da parede diafragma (seção 4 + 81,60).

Tabela 2 – Piezômetros elétricos instalados na região da parede diafragma (Intertechne, 2010)

ID	Afastamento em relação ao eixo (m)		Cota	Data Instalação
	M	J		
PE-PD01	1,84	-	87,13	14/08/10
PE-PD02	1,84	-	108,0	15/08/10
PE-PD03	1,84	-	116,0	17/08/10
PE-PD04	-	1,99	84,51	23/08/10
PE-PD05	-	1,99	108,0	23/08/10
PE-PD06	-	1,99	115,5	24/08/10

Os piezômetros elétricos instalados nesse local são do tipo corda vibrante, modelo 4500S da Geokon. São constituídos basicamente por um transdutor de pressão, tipo corda vibrante, e um termistor para medida de temperatura. Ambos estão protegidos por um tubo cilíndrico inoxidável com dimensões de $\frac{3}{4}$ " de diâmetro externo e 135 mm de comprimento. Uma das pontas desse tubo tem a entrada do cabo

elétrico, selada com um composto epóxi. Na ponta oposta, o encaixe para o filtro de aço inox sinterizado que comunica a carga piezométrica ao diafragma interno e este, por sua vez, modifica a tensão da corda vibrante. No momento da leitura, o período da vibração varia conforme essa tensão é alterada, proporcionalmente à pressão piezométrica.

As principais características dos piezômetros elétricos utilizados na UHE Estreito são:

- Campo de leitura: 350 kPa;
- Resolução de leitura: 0,025% FE;
- Precisão: 0,1% FE (para expressão linear);
- Desvio do zero: <0,5% FE;
- Temperatura de operação: -20°C a 80°C;
- Dimensões: diâmetro de 19,1 mm e comprimento de 133 mm.

Em 29/08/2010, com a conclusão dos serviços e a completa remoção da mureta guia e aterramento da parede diafragma foi realizado um teste para verificação da eficiência da Parede Diafragma. As bombas dos poços de rebaixamento das ensecadeiras de montante e jusante foram desligadas e começou-se a monitorar os piezômetros instalados. As bombas permaneceram desligadas durante todo o período. A leitura das cargas piezométricas se

estendeu até 10/9/2010. Imediatamente antes do desligamento das bombas, o NA ao longo da parede diafragma estava próximo a elevação 118,00m, em média, tanto a montante quanto jusante. Observou-se que após o desligamento do sistema de rebaixamento, a carga dos piezômetros a montante da parede subiu 12 m rapidamente, estabilizando em ~130,00m. O NA de jusante teve um comportamento de subida mais lento, variando cerca de 3m e chegando a elevação 121,00m, aproximadamente. O desnível entre montante e jusante da parede se manteve em torno de 9m após o quinto dia do ensaio. Este comportamento evidenciou a eficiência de vedação da parede diafragma em um período pós-execução. Essa análise foi descrita por Azeredo et al (2011).

3 COMPORTAMENTO ATUAL E ANÁLISE DA PAREDE DIAFRAGMA

Na sequência estão apresentadas as principais considerações relacionadas ao comportamento dos piezômetros elétricos e análises da eficiência da parede diafragma, considerando o tempo de operação desta estrutura.

3.1 Instrumentação

Os piezômetros elétricos instalados no entorno da parede diafragma apresentam um comportamento adequado, mostrando a perda de carga de montante para jusante de aproximadamente 13 m.

A Figura 4 e Figura 5 apresentam as cargas piezométricas no interior do maciço de fundação a da Barragem de Terra. Observa-se a perda de carga significativa montante-jusante, principalmente no entorno da parede diafragma, objetivo deste trabalho técnico.

A Projetista, com base em análises de percolação, adotou como valores de referência os valores apresentados na Tabela 3. Os valores de referência foram determinados considerando regime permanente de fluxo, com o reservatório no nível normal de operação na El. 156,00m e o nível de jusante em condição normal máxima na El. 134,45m.

Observa-se que as cargas piezométricas existentes são ligeiramente inferiores aos valores estimados no Projeto, ou seja, a condição é satisfatória caso a análise fosse realizada unicamente em relação aos valores estimados pela Projetista.

A Tabela 4 apresenta os valores de perda de carga montante-jusante obtidos através dos piezômetros em campo, além da eficiência da perda de carga calculada entre os piezômetros.

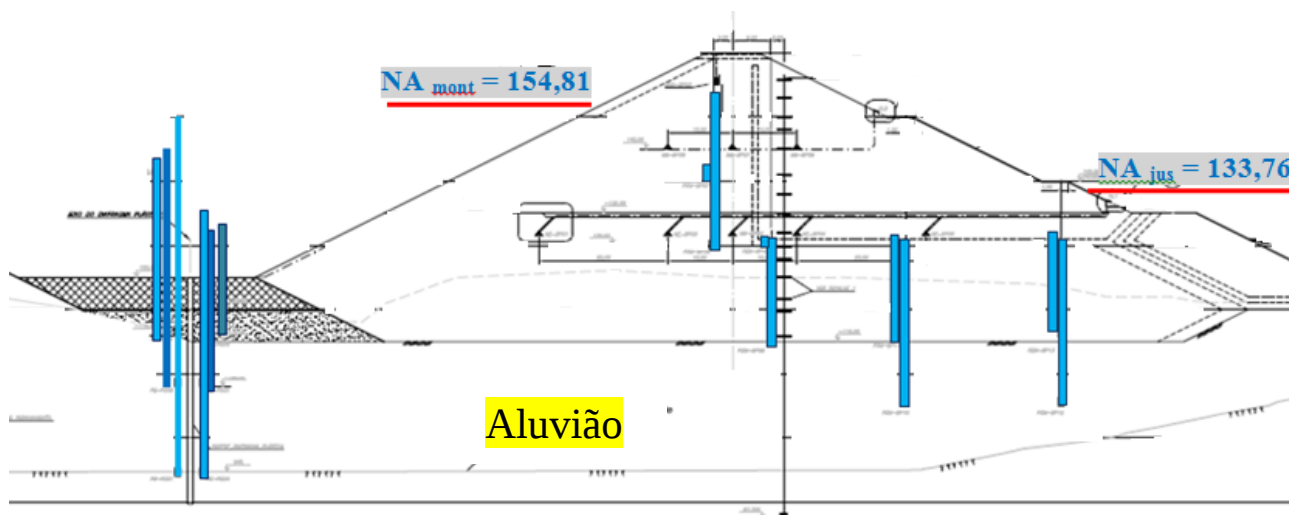


Figura 4. Cargas piezométricas na seção 4 + 81,60. (CESTE, 2015 / Leme Engenharia, 2015)

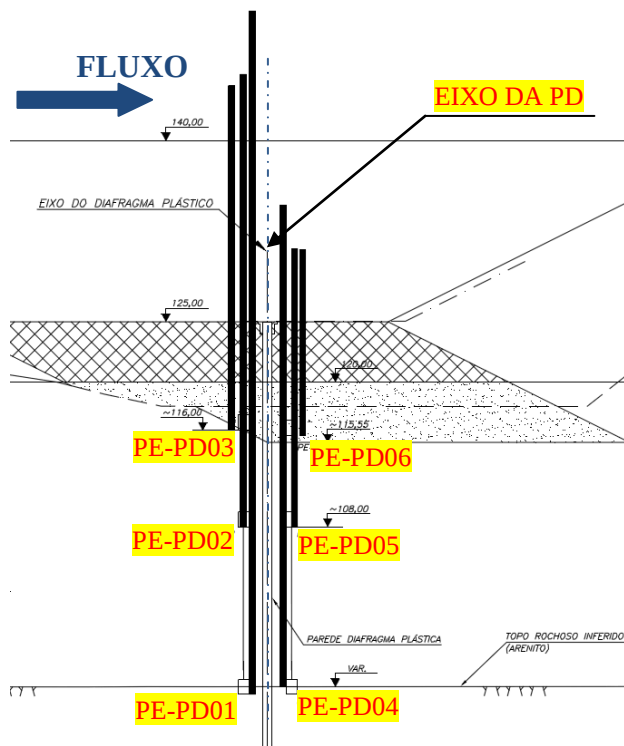


Figura 5. Detalhe das cargas piezométricas na parede diafragma plástica (PD)

Tabela 3 – Cargas piezométricas

ID	Cargas Piezométricas [m.c.a.]	
	Atual (11/12/15)*	Referência (Projeto)
PE-PD01	56,63	65,87
PE-PD02	37,53	44,00
PE-PD03	28,60	35,00
PE-PD04	39,93	43,49
PE-PD05	23,05	24,50
PE-PD06	15,43	16,45

*No dia 11/12/15 o nível de montante era 155,34m e o de jusante 130,67 m.

Tabela 4 – Perda de carga montante-jusante da PD

ID Montante	ID Jusante	Perda de Carga [m.c.a.]	Eficiência [%]
		Atual (11/12/15)	
PE-PD01	PE-PD04	16,7	78,93%
PE-PD02	PE-PD05	14,48	68,17%
PE-PD03	PE-PD09	13,17	61,82%

A Figura 6 apresenta o histórico de variações da cota piezométrica em relação às variações de nível de jusante e montante.

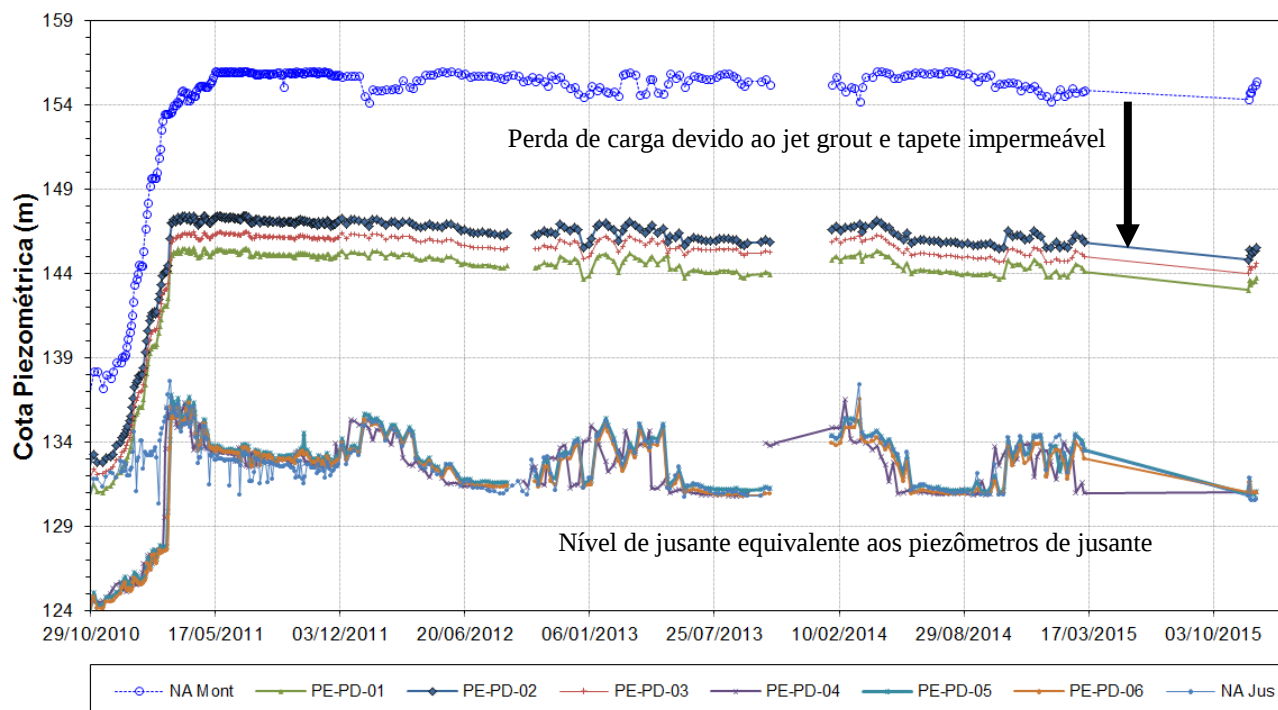


Figura 6. Variação histórica das cotas piezométricas nos piezômetros da Parede Diafragma em relação aos níveis de montante e jusante

Constata-se que a variação dos piezômetros instalados a montante da parede diafragma são proporcionais às variações de nível de montante, no entanto, com cotas piezométricas inferiores ao nível de água do reservatório. Esse fato é justificado pela perda de carga que ocorre devido ao jet grout executado na ensecadeira de montante e ao tapete impermeável junto a barragem.

Nos piezômetros a jusante da parede diafragma, os valores de cotas piezométricas estão muito próximos ao nível de jusante. Ou seja, a jusante da parede diafragma não ocorre perda de carga relevante no trecho de fundação até encontrar o nível de jusante. Isso corresponde a um comportamento satisfatório, devido a alta permeabilidade do maciço.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais considerações e conclusões neste trabalho estão apresentadas na sequência:

a) A perda de carga de montante para jusante mostra o bom desempenho da parede diafragma, indicando que essa estrutura vem cumprindo sua função, e evitando o possível carreamento de material pela fundação;

b) As variações das cargas piezométricas estão atreladas as variações dos níveis de montante e jusante, de forma bastante rápida, fato esperado devido a alta permeabilidade do maciço.

c) Os piezômetros de montante tem valores inferiores ao nível de montante, mostrando que o jet grout implantado na ensecadeira de montante, assim como o tapete impermeável, apresentam contribuição em relação à perda de carga ao longo deste trecho.

d) Os piezômetros de jusante demonstraram o comportamento hidrogeológico do maciço, de alta permeabilidade, onde o nível de jusante e a cota piezométrica dos piezômetros se equivalem, mostrando que a perda de carga é praticamente nula no trecho entre os piezômetros e jusante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CESTE pela autorização para publicação deste trabalho técnico.

REFERÊNCIAS

Azeredo, A.L.C.; Meirelles, M.C.; LUCENTI, F.; Silva, S.A. (2011) Desempenho da Parede Diafragma Plástica na UHE Estreito, *XXVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens*, CBDB, Rio de Janeiro, Brasil.

CESTE – Consórcio Estreito Energia (2011 – 2016), Dados de Instrumentação UHE Estreito.

Intertechne. (2010) ES2-RT-C-USC/IN-001. AHE Estreito. Projeto Executivo. Plano de Monitoramento e Inspeções das Obras Cíveis do Aproveitamento.

Leme Engenharia. (2010). ES2-RT-L-BAC/GG-001-Rev c. UHE Estreito – Engenharia do Contratante. *Parede Diafragma – Acompanhamento da Construção e Controle de Qualidade*.

Leme Engenharia (2011-2016), *Arquivos Internos*.