

Monitoramento de Obras de Terra utilizando Fibra Óptica - Barragem da UHE Colíder

Carina Pirolli

COPEL Geração e Transmissão, Curitiba, Brasil, carina.pirolli@copel.com

Alessander C. Morales Kormann

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, alessander@ufpr.br

Rafael Tiago Vendramin

COPEL Geração e Transmissão, Curitiba, Brasil, rafael.vendramin@copel.com

Luiz Alkimin Lacerda

Institutos Lactec, Curitiba, Brasil, alkimin@lactec.org.br

RESUMO: A utilização de uma rede de cabos de fibra óptica estendida ao longo da estrutura permite monitorar de maneira abrangente a área coberta por este instrumento de controle, não se limitando a verificações pontuais, diferentemente de sua utilização apenas como transmissor confiável e veloz de dados. Dado ineditismo desta ferramenta e da importância que representa para aterros em solos, a COPEL GeT em parceria com os Institutos Lactec, está desenvolvendo um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento P&D intitulado Monitoramento de Obras de Terra Através de Fibras Ópticas. O objetivo do projeto é incorporar ao sistema de monitoramento convencional um novo tipo de sensor possibilitando além da avaliação, a quantificação distribuída do fluxo de água interno no maciço de uma barragem de terra. O presente trabalho apresenta o estágio de desenvolvimento deste projeto de Pesquisa e Desenvolvimento inovador, que objetiva obter uma metodologia para a aplicação de sensores de fibra óptica visando o monitoramento distribuído de temperatura para a detecção de riscos de processos erosivos em barragens de terra. A proposta contempla a instalação da fibra óptica num trecho de 500 metros, instalada no filtro vertical e tapete drenante horizontal da barragem margem esquerda da UHE Colíder que está sendo construída pela COPEL no estado do Mato Grosso-MT. A avaliação da representatividade e significado das variações lidas na temperatura em campo está sendo realizada a partir da calibração em laboratório dos cabos de fibra óptica numa célula de pressão construída com os mesmos materiais da barragem e condições de carregamento semelhantes, tentando obter resultados os mais próximos possíveis da realidade de campo, intencionando-se avaliar as relações entre percolação através de aterros construídos em solos e a eficiência do monitoramento destas percolações através da utilização de fibras ópticas. Além das etapas de instalação de campo e calibração em laboratório o presente projeto consiste ainda em gerar mapas de risco potencial e propor metodologia de análise para inserção dos dados no Plano de Segurança da barragem da UHE Colíder.

PALAVRAS-CHAVE: obras de terra, fibra óptica, análise de percolação.

1 INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta parte do resultado do projeto de P&D PD-6491-03013/2013, intitulado "Monitoramento de Obras de Terra

Através de Fibras Ópticas", executado pelos Institutos LACTEC e COPEL GeT como parte das obrigações desta última junto ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor

A UHE Colíder localiza-se entre os municípios de Nova Canaã do Norte e Cláudia, rio Teles Pires, estado do Mato Grosso. O arranjo geral compõe um total de

empreendimento possui N.A. Máximo Normal e Máximo Maximorum na cota 272,00 m. A Figura 1 apresenta o arranjo geral do empreendimento.

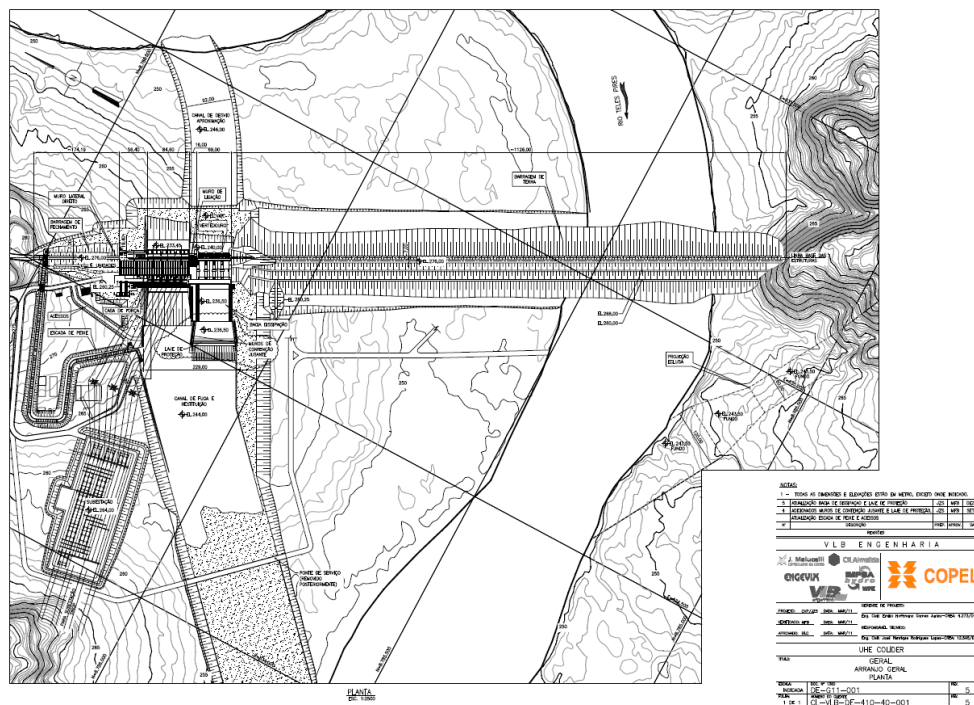


Figura 1. Arranjo Geral UHE Colíder com o trecho objeto (Projeto VLB Engenharia).

Como o objetivo principal desse estudo é o trecho de barragem onde foi instalada a fibra óptica, o detalhamento de estruturas será apenas para esse trecho.

A Barragem Leito do Rio e Margem Esquerda possui aproximadamente 520,5 m de comprimento, 37,0 m de altura máxima, crista com largura de 7,0 m na El. 276,00. A seção típica da barragem é composta por um material coluvionar no espaldar de montante, núcleo e no espaldar de jusante acima da El. 268,00, abaixo

dessa cota tem-se um random, proveniente de escavações obrigatórias. O sistema de drenagem interno da barragem é composto por um filtro vertical de areia com espessura de 0,80 m e tapete horizontal do tipo sanduíche com 1,20 m de espessura total, sendo 0,20 m de areia, 0,20 m de pedrisco, 0,40 m de brita 1, 0,20 m de pedrisco e 0,20 m de areia. A Figura 2 apresenta uma seção típica da barragem leito do rio.

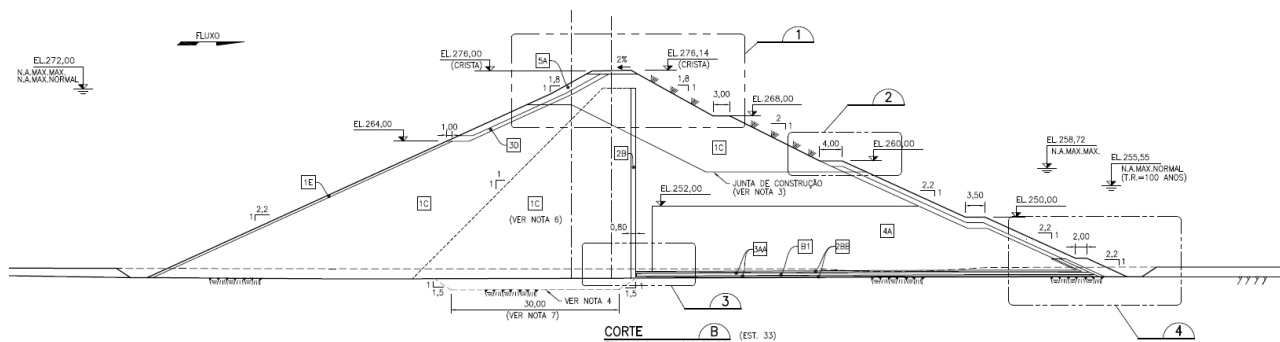


Figura 2. Seção Típica Barragem Leito do Rio – UHE Colíder (Projeto VLB Engenharia).

A geologia local é constituída por arenitos claros a avermelhados, sobretudo arcoseanos, médios a grosseiros, mal selecionados, estratificação cruzada do tipo tabular, micáceos, bastante silicificados quando em zona de falha. Localmente ocorre presença de conglomerado polimítico de natureza lenticular os quais, quando mal cimentados, apresentam comportamento típico de cascalhos.

Localmente o maciço é constituído por camadas de rocha de média resistência (arenitos) e branda (siltitos e argilitos) que mergulham de montante para jusante e da direita para a esquerda hidráulica.

Esses maciços apresentam resistência a compressão simples de até 25 MPa (R2/R3 conforme classificação da ABGE), considerando-se adequados como maciços de fundação das estruturas já que as camadas de material mais branda além de não serem persistentes, apresentam-se em pequenas espessuras.

A instrumentação convencional da barragem margem esquerda e leito do rio é composta por basicamente 12 piezômetros e 24 marcos superficiais instalados ao longo de 5 seções, tendo como princípio básico o monitoramento do funcionamento do sistema interno de drenagem e das subpressões na fundação da barragem. Ressalta-se que essa barragem, como pode ser observado na seção apresentada na Figura 2 irá operar basicamente todo tempo com níveis de água a jusante, impedindo monitoramento de percolações por medidores de vazão convencionais.

A inexistência de medidores de vazão foi mais um motivador para a participação dos técnicos no desenvolvimento de um Projeto de Pesquisa inovador no sentido de monitoramento de percolação em maciços de terra utilizando variação de temperatura como parâmetro. O processo será descrito nos itens que seguem esse trabalho.

Segundo o conceito atual de segurança, a barragem foi projetada para apresentar bom desempenho ao longo do tempo com respeito aos aspectos estruturais, econômicos e ambientais.

2 SISTEMA INSTALADO

O objetivo do desenvolvimento do P&D “Instrumentação Óptica DTS da barragem da UHE Colíder” é incorporar ao sistema de monitoramento convencional um novo tipo de sensor que possibilita além da avaliação, a quantificação distribuída, e não pontual do fluxo de água interno de um trecho do maciço de terra da barragem através da tecnologia de fibra óptica distribuída de temperatura pelo método do aquecimento.

Destaca-se nessa pesquisa a interação entre atividades de campo e de laboratório, onde modelos laboratoriais estão sendo desenvolvidos para calibração dos sensores de fibra óptica já instalados no interior da barragem de terra. A infraestrutura implantada em laboratório é utilizada além de execução de ensaios com materiais da barragem, também para a calibração do sensor semelhante ao instalado em campo submetido a variações de condição de percolação que podem ser esperadas no modelo real.

2.1 Tecnologia de Fibra Óptica

Com o desenvolvimento da indústria de fibra óptica a partir da década de 80 reconheceu-se a possibilidade de utilização dessa tecnologia para determinar várias grandezas físicas, como: deformação, deslocamento, aceleração, pressão, temperatura e propriedades químicas (Morikawa, 2004).

A fibra óptica é um filamento, geralmente constituído de material dielétrico de sílica (vidro) ou poliamida (plástico), incolor pelo qual pode ser atravessado um feixe luminoso, por meio de reflexões consecutivas, com mínimas perdas de transmissão de informações a longa distância. As fibras de vidro são as mais utilizadas por possuírem maior pureza que aquelas feitas em poliamida. O vidro transmite luz por grandes distâncias (Buras, 2013).

A estrutura básica é composta de um núcleo, uma interface polimérica e uma capa protetora. O núcleo é a região central onde se encontra o fio de vidro, no caso de fibras ópticas de sílica, e por onde ocorre a passagem de luz.

2.1.1 Medida Distribuída de Temperatura – Tecnologia DTS

A técnica de medição distribuída de temperatura utilizando fibra óptica com a tecnologia DTS baseia-se nas propriedades de sensibilidade de variação térmica onde a fibra atua como sensor (Aufleger et. al., 2008).

O pulso de luz é refletido na estrutura da fibra. A reflexão provoca o retroespalhamento de dois tipos de radiação, tornando possível sua interpretação através de equipamentos de leitura. Quando a energia do pulso é reduzida, picos de Stokes são observados, e quando são aumentados os picos de anti-stokes sofrem influência. A determinação da temperatura é baseada na relação entre anti-stokes e Stokes. A Figura 3 mostra o espectro de luz retroespalhada.

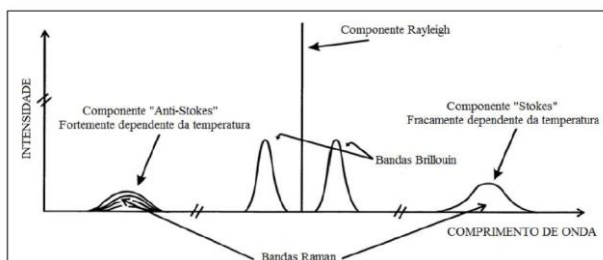


Figura 3. Espectro de Luz Retroespalhada (Smolen et. al., 2003).

Combinando a análise do espectro da luz retroespalhada com o conhecimento da velocidade da luz no interior do núcleo da fibra óptica e o tempo que leva para retornar a fonte emissora, pode-se determinar a temperatura de qualquer ponto ao longo da fibra.

Conforme Aufleger (2005) em estruturas

hidráulicas como barragens e diques, a temperatura interna é função do fluxo existente, definido pelas condições de contorno. Variações externas de temperatura podem provocar alterações nas temperaturas que não são decorridas do aumento de fluxo.

2.2 Instalação da Fibra Óptica em Campo

A barragem de UHE Colíder, conforme o manual de operação e monitoramento de barragem de terra e enrocamento, previu ao longo de cerca de 1.350 m a instalação de 64 marcos superficiais, 50 piezômetros tipo Casagrande, além de 2 medidores de nível de água (ombreira esquerda) e um medidor de vazão (ombreira direita).

Além desse sistema foi instalado, como projeto P&D, um conjunto de fibra óptica e piezômetros de Bragg.

O comprimento de quase 5.000 m de fibra óptica instalada foi posicionado no sistema de drenagem da barragem margem esquerda, para o tapete drenante horizontal, entre as estacas 29+20 m e 38+30 m (1.325 m), e para o filtro vertical, entre as estacas 25+20 m e 38+30 m (3.621 m).

Os dois piezômetros de Bragg determinados para o projeto foram instalados em uma seção na estaca 34 do mesmo trecho da barragem, com objetivo de complementar os resultados obtidos pelo cabo óptico.

As Figuras 4 e 5 apresentam respectivamente, locação da fibra no filtro vertical e no tapete drenante horizontal.

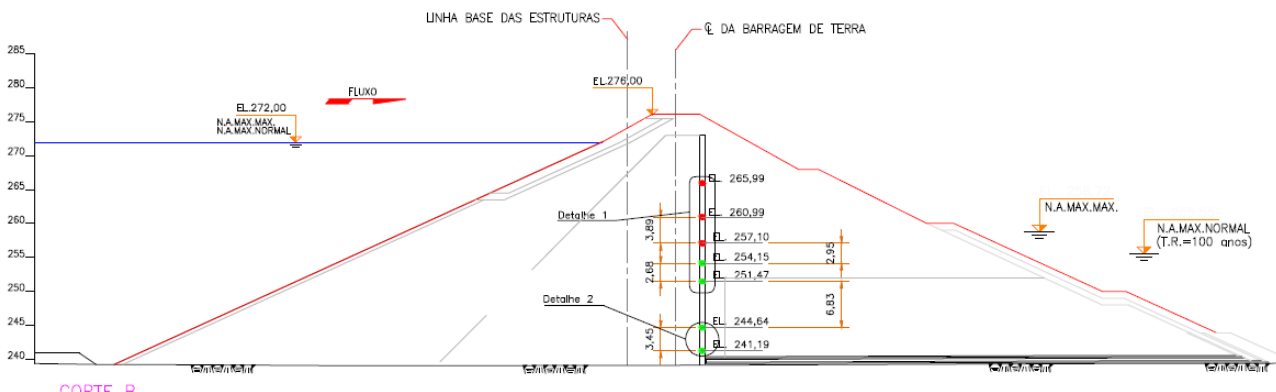
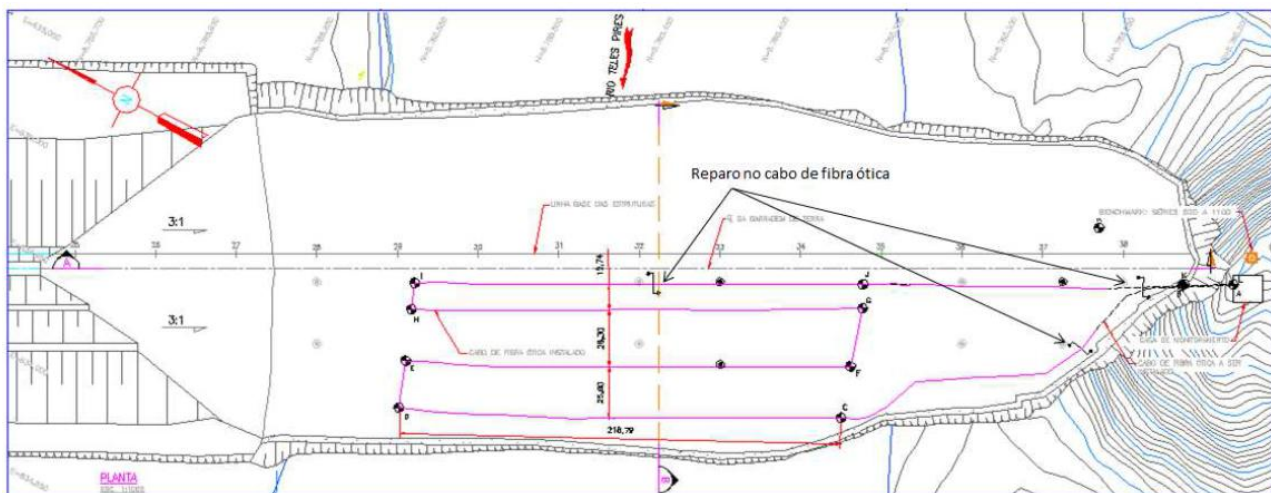


Figura 4. Locação da fibra no filtro vertical.



2.2.1 Procedimento de instalação

A fibra instalada ao longo do tapete drenante e do filtro tipo sanduíche foi posicionada na camada superior do mesmo, no material definido em projeto como 2BB (areia média/grossa compactada).

Para o filtro vertical, a fibra foi posicionada na face de jusante do filtro com material 2B (areia fina compactada), percorrendo todo o filtro da barragem margem esquerda a cada 4m, aproximadamente, de alteamento do aterro.

Tabela 1. Materiais de filtro vertical (FV) e tapete drenante (TD) onde se posicionaram a fibra óptica.

Solo	k m/s	γ kN/m ³	c' kPa	ϕ' (°)
2B - areia fina – FV	0,00025	18	0	32
2BB - areia média – TD	0,0001	18	0	32
3AA - transição média - TD	0,0014	19	0	32
B1 - brita 1 – TD	0,05	21	0	40

A instalação da fibra óptica na camada superior, 2BB, do tapete drenante foi realizada entre os dias 28 e 29 de abril de 2014 quando da conclusão do tapete entre as estacas 29+20m e 35. O posicionamento seguiu o projeto, conforme Figura 4, finalizando em duas pontas, sendo uma próxima ao filtro vertical (3m) e outra no final, a jusante, do tapete drenante. A partir da estaca 35, iniciou-se a ombreira esquerda, sendo que o lançamento do cabo seguiu o alteamento do aterro da barragem, até sua conclusão em meados de outubro de 2014.

No filtro vertical, com material 2B, o

lançamento da fibra óptica iniciou em 4 de junho de 2014 junto com o alteamento do núcleo da barragem margem esquerda. O filtro é aberto no núcleo com escavadeira a cada 1,5 m executado, portanto a cada 3 aberturas de núcleo para execução de filtro, aproximadamente, a fibra percorreu a abertura, sempre posicionada na face de jusante.

Para o posicionamento da fibra, no filtro vertical e tapete drenante, mobilizaram-se um caminhão munck e uma escavadeira para transporte de bobina de fibra, um engenheiro e técnico responsáveis pelo projeto, um engenheiro de campo e equipe de consórcio construtor para mão-de-obra.

2.2.2 Fotos de Instalação

As Figuras 6 a 9 a seguir apresentam imagens do processo de instalação da fibra óptica em campo.



Figura 6. Local de posicionamento da fibra no tapete drenante horizontal entre estacas 29+20m e 35.



Figura 7. Instalação da fibra no filtro vertical.



Figura 8. Posicionamento da fibra no filtro vertical, face de jusante.



Figura 9. Fibra instalada no filtro vertical aguardando fechamento de filtro com material 2B e continuidade de núcleo.

2.3 Ensaios de Laboratório

Os ensaios da fibra óptica em laboratório vêm sendo realizado com uma ampla gama de fluxos, numa tentativa de avaliar o comportamento do sistema de calibração para diferentes condições, realizando os ajustes que se fizerem necessários ao longo do processo. A Tabela 2 apresenta os parâmetros programados para realização de ensaios.

Tabela 2. Parâmetros Ensaios de Laboratório para calibração do cabo.

Parâmetro	Condições
Índice de vazios (adimensional)	a) Condição do filtro e tapete em obra (0,68) b) Condição mais compacta (a ser definida)
Velocidade de percolação (m/s)	a) 0,00 (equivalente a 0,0 l/s) b) $4,17 \times 10^{-6}$ c) $8,34 \times 10^{-6}$ d) $1,67 \times 10^{-5}$ (equivalente a 0,1 l/s) e) $3,34 \times 10^{-5}$ f) $8,34 \times 10^{-5}$ (equivalente a 0,5 l/s) g) $1,00 \times 10^{-4}$ h) $1,33 \times 10^{-4}$ i) $2,67 \times 10^{-4}$ (equivalente a 1,6 l/s)
Potência (W/m)	a) 10 b) 15

A velocidade de percolação da água pelo solo, a rigor, depende da carga hidráulica atuante (ou gradiente hidráulico) e das condições de permeabilidade do meio (k), conforme expresso pela Lei de Darcy ($v=k.i$). Ressalta-se que no protótipo, diferentemente da célula de pressão, existem variações nos gradientes hidráulicos ao longo da barragem, variando conseqüentemente as velocidades de percolação. Assim, ao longo da pesquisa intenciona-se determinar a condição de fluxo e velocidade esperada nas diferentes cotas por onde cruza a fibra.

Em laboratório, o controle da velocidade de fluxo de água pelo solo é condicionado à vazão global no registro de saída da célula de pressão. Este é outro fator que diferencia os ensaios do modelo em relação ao real. Foi estabelecida uma altura hidráulica mínima em laboratório, que garantisse uma vazão de saída superior a 3 l/s.

Para os primeiros ensaios foram adotadas as velocidades correspondentes às vazões de saída de 0,0 l/s, 0,1 l/s, 0,2 l/s, 0,4 l/s, 0,8 l/s, 1,2 l/s e 1,6 l/s.

Cada ensaio foi conduzido por um período médio de 6,5 h, incluindo os preparativos de início (1h) e fechamento (30 minutos) do

ensaio. Após o estabelecimento da condição de fluxo de saída, segue um período de 30 minutos de monitoramento das temperaturas no interior da célula de pressão. Em seguida, o sistema de potência é acionado para realizar o aquecimento do cabo por duas horas. O sistema continua sendo monitorado. Procede-se então o desligamento do sistema de potência e registram-se as temperaturas durante o período de resfriamento por mais duas horas. A Figura 10 apresenta um esquema gráfico desta sequência de ensaio.

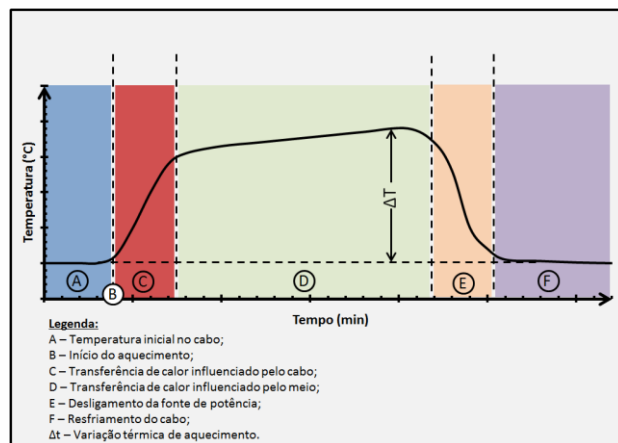


Figura 10. Esquema de monitoramento do cabo, ensaios de laboratório.

Na Figura 11 apresenta-se uma seção transversal da célula de pressão com os dois níveis de instalação do cabo no interior do solo. O primeiro nível foi convencionado como cabo superior e encontra-se a 66 cm da superfície do solo, enquanto que o cabo inferior encontra-se a 33 cm da superfície do solo.

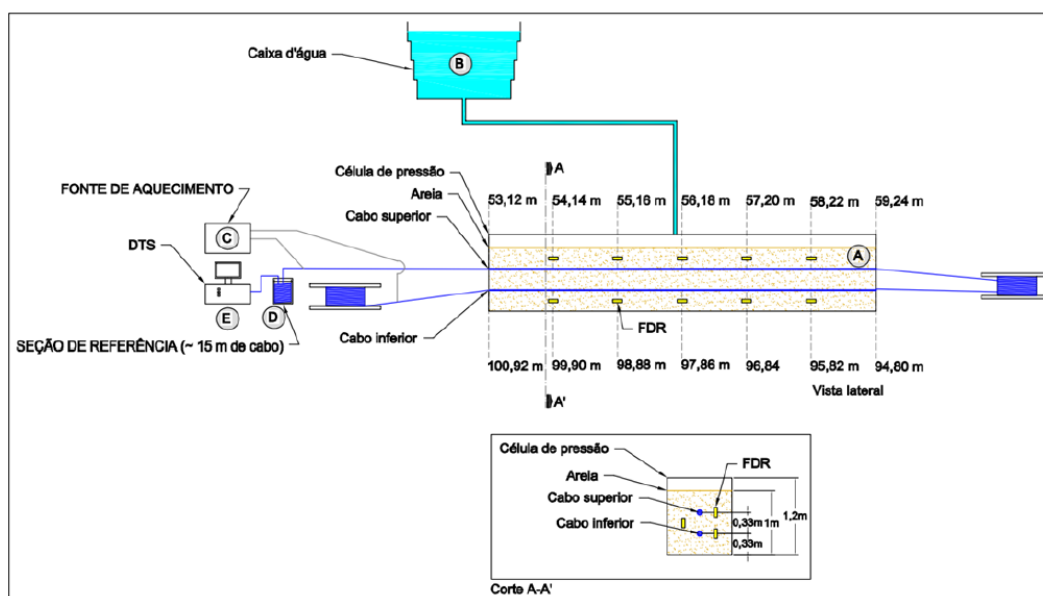


Figura 11. Seção transversal da célula de pressão.

3 RESULTADOS

Como o procedimento de realização dos ensaios na célula de pressão encontra-se ainda em fase inicial, não serão discutidos resultados da etapa de laboratório, limitando-se a apresentação conceitual do procedimento.

O projeto se encontra no mês de número 28, de um total de 42 meses. A realização deste foi dividida em etapas. Entre essas etapas destaca-se: instalação de campo, caracterização e ensaios de laboratório, monitoramento em campo, desenvolvimento de caixa de percolação para calibração dos cabos em laboratório e modelagem numérica.

A partir dos ensaios em modelo atualmente em andamento, o sistema de medição será calibrado em laboratório e testado no protótipo.

Espera-se como resultado final que o projeto permita a geração de mapas de risco potencial, propondo uma metodologia de análise para inserção dos dados no Plano de Segurança da barragem da UHE Colíder com a quantificação do fluxo de água no sistema de drenagem interno da barragem, comparando com valores limites para início da ocorrência de processos erosivos.

Objetiva-se também obter como resultado, a validação do modelo computacional desenvolvido no Projeto P&D acoplando fenômenos de transferência de fluxo de calor e fluxo de água em meios porosos para avaliação dos fatores de influência e interpretação dos dados para utilização em outros casos de aplicação.

A interpretação dos dados associada ao modelo computacional poderá subsidiar também os resultados de desempenho da instrumentação convencional, previstos no Plano de Ação Emergencial da UHE Colíder, possibilitando ações corretivas de eventuais anomalias detectadas durante a vida útil do empreendimento, contribuindo assim no controle de segurança da estrutura.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método de monitoramento distribuído de fibras ópticas possui as características necessárias não só para identificar a posição de anomalias, como também para quantificar a magnitude. A medida de temperatura é, portanto, uma forma indireta de se detectar a presença de infiltrações, saturação ou mesmo percolação em meios granulares, tendo em vista que a condutividade térmica do meio depende da presença ou variação destes parâmetros.

Embora ainda não utilizada comumente para monitoramento de percolação de água, essa ferramenta se mostra em potencial para utilização não só no monitoramento de barragens como também em taludes, já que os dados são obtidos de maneira distribuída e acompanhados remotamente.

Recomenda-se que as pesquisas continuem especialmente na tentativa de utilizar a tecnologia também em materiais não granulares, apesar desses apresentarem sabidamente menor condutividade hidráulica.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a nossos colegas de trabalho pela revisão desse artigo e participação na coleta de dados.

Também agradecemos aos profissionais do Instituto Lactec e COPEL que fazem parte diretamente dessa pesquisa, pelo desempenho e dedicação no sentido de alcançar os objetivos buscados inicialmente, e também pelo fornecimento de dados.

Agradecemos a VLB Engenharia, pela autorização de uso dos Projetos desenvolvidos para a UHE Colíder.

REFERÊNCIAS

- Aufleger, M.; Conrad, M.; Perzmaier, S.; Porras, P. e Strobl, T. (2005) *Distributed Fibre Optics Temperature Measurement on its way to become an ordinary tool in Dam Monitoring*. Hydro Review Worldwide, v. 13, HCI Publications, Kansas City, USA.
- Aufleger, M.; Goltz, M. e Kapeller, G. (2008) *Groundwater Monitoring Using Distributed flow Velocity Measurements*. In: IAHR International Groundwater Symposium. Istanbul: Bogazici University.
- Buras, M. (2013) *Aplicação de Sensores Distribuídos de Fibra Óptica em um Modelo Experimental para Monitoramento de Movimentos de Massa*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR. Paraná.
- Morikawa, S. R. K. (2004) *Acelerômetro Triaxial a Redes de Bragg*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Rio de Janeiro.
- Smolen, J. J. e Spek, A. V. D. (2003) *Distributed Temperature Sensing – A DTS Primer for Oil & Gas Production*. Shell, 2003.