

# UTILIZAÇÃO DE FIBRA ÓPTICA PARA DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADES DE FLUXO

## Utilization of fiber optics for determining flow velocities

Carina Pirolli<sup>a</sup>, Alessander Christopher Morales Kormann<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Curitiba (PR), Brasil.

**RESUMO** – A infiltração através de estruturas hidráulicas e de terra representa um risco substancial de danos, incluindo a ruptura de barragens devido à erosão interna regressiva. Deste modo é imprescindível monitorar o fluxo de água na estrutura da barragem, sendo a fibra óptica uma das ferramentas para realização desse monitoramento. A utilização de cabos de fibra óptica estendidos ao longo da estrutura permite monitorar de maneira abrangente a área coberta por este instrumento de controle, não se limitando a verificações pontuais. Dado o ineditismo desta ferramenta e a importância que representa para aterros em solos, o assunto vem sendo objeto de um projeto de pesquisa e desenvolvimento. A proposta contemplou a instalação de mais de 6 km de fibra óptica num trecho de 500 m, instalada no filtro vertical tapete drenante horizontal da barragem margem esquerda e leito do rio da Usina Hidrelétrica Colíder, localizada no estado do Mato Grosso, região centro-oeste do Brasil. O presente trabalho busca, a partir de ensaios de laboratório realizados numa célula de pressão, reconhecer a fibra óptica como uma opção para o monitoramento das variações de fluxo. A utilização de cabos de fibra óptica, diferentemente do sistema de monitoramento convencional, se coloca como um novo tipo de sensor possibilitando além da avaliação, a quantificação distribuída do fluxo de água interno no maciço de uma barragem de terra. A avaliação da representatividade e do significado das variações lidas na temperatura em campo foi realizada a partir do desenvolvimento de funções que relacionam variação de temperatura com variação da velocidade de fluxo.

**SYNOPSIS** – Infiltration through hydraulic and earth structures poses a substantial risk of damage, including dam failure due to regressive internal erosion. Therefore, it is essential to monitor the flow of water in the dam structure, being the optical fiber one of the tools to perform this monitoring. The use of fiber optic cables extended along the structure allows for comprehensive monitoring of the area covered by this control instrument, not limited to spot checks. Given the unprecedentedness of this tool and the importance it represents for landfills, the subject has been the subject of a Research and Development Project. The proposal included the installation of more than 6 km of optical fiber in a 500 m stretch, installed on the vertical filter horizontal draining mat of the left bank dam and the Colíder Hydroelectric Power Plant, located in the state of Mato Grosso, midwest region of Brazil. Based on laboratory tests performed in a pressure cell, the present work seeks to recognize fiber optics as an option for monitoring flow variations. The use of fiber optic cables, unlike the conventional monitoring system, is placed as a new type of sensor allowing, besides the evaluation, the distributed quantification of the internal water flow in the massif of an earth dam. The evaluation of the significance of the meaning of the read variations in the field temperature was performed from the development of functions that relate temperature variation with flow velocity variation.

**Palavras Chave** – Fibra óptica, modelo de laboratório, análise de percolação.

**Keywords** – Optical fiber, lab model, seepage analysis.

---

E-mails: carina.pirolli@gmail.com (C. Pirolli), alessander@ufpr.br (A. Kormann)

## 1 INTRODUÇÃO

A aplicação de sensores de fibra óptica para o monitoramento geotécnico vem sendo empregada mundialmente. A utilização de um cabo de fibra óptica pode abranger o monitoramento de uma área muito superior quando comparado à instrumentação convencional. Trabalhos de Aufleger et al. (2003), Glisic et al. (1999), Koga et al. (2003), Watley e Johansson (2005) e Aufleger et al. (2005), são alguns exemplos que comprovam o potencial da tecnologia.

A Copel Geração e Transmissão S.A (Copel GeT), em parceria com os Institutos Lactec, realizou a instalação pioneira no Brasil de cabos de fibra óptica no tapete drenante horizontal e filtro vertical da barragem de terra da Usina Hidroelétrica Colíder, com o intuito de avaliar a segurança da barragem ao longo do tempo, a partir da detecção de fluxos de água pelo corpo da barragem. Para calibrar o sistema, a equipe de projeto composta por profissionais dos Institutos Lactec e acompanhamento de profissionais da Copel concebeu um modelo experimental para a execução de ensaios de laboratório, os quais integram o escopo de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D nº PD-6491-0313/2013, denominado “Monitoramento de obras de terra através de fibras ópticas”, executado pelos Institutos Lactec e Copel GeT, como parte das obrigações Copel GeT junto ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este item descreve o modelo experimental desenvolvido para realização dos ensaios laboratoriais de calibração do cabo de fibra óptica e a metodologia considerada para a análise dos dados obtidos através destes ensaios.

Com o advento da tecnologia de laser, as medidas distribuídas de temperatura da fibra óptica tornaram-se disponíveis para o uso em aplicações da engenharia hidráulica. A determinação de maneira distribuída permite o uso de cabos de fibra óptica para medir temperaturas em longos alcances, com alta densidade de informações e com uma resolução de temperatura que atende as necessidades do que se propõe.

O modelo experimental desenvolvido pela equipe do projeto envolveu a construção de uma célula de pressão, preenchida com material granular compactado, com características que buscam reproduzir as condições verificadas na barragem da UHE Colíder. O material granular envolve o cabo de fibra óptica, o qual é conectado a um sistema de aquecimento e ao instrumento de medição DTS (Distributed Temperature Sensing), compondo o sistema utilizado para identificação de variações de temperatura ao longo do cabo. A equipe de projeto realizou ensaios utilizando um valor de vazão conhecido e verificando as temperaturas correspondentes. O modelo foi implantado nas dependências do Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza, em Curitiba (Brasil). Como referência, a equipe utilizou o modelo demonstrado no trabalho de Goltz (2012).

Os ensaios laboratoriais para medições de temperatura distribuída utilizando fibra óptica tiveram o objetivo de obter uma curva de calibração que relaciona velocidade de fluxo x variação de temperatura, contribuindo para o entendimento dos resultados de temperatura observados durante a etapa na qual se realiza o monitoramento da barragem.

Uma vez que o modelo de laboratório tem por objetivo calibrar os cabos de fibra óptica instalados na UHE Colíder, o cabo utilizado em laboratório é o mesmo do protótipo. Da mesma forma, os ensaios foram realizados com o mesmo material e densidade empregados na obra da barragem.

### 2.1 Medidas de Temperatura e Detecção de Fluxo

As aplicações ativas com sistemas de Medidas Distribuídas de Temperatura em Fibra Óptica (Distributed Fiber Optic Temperature – DFOT) decorrem do método do aquecimento. Para utilizar

este método o cabo é composto por um fio de cobre junto às fibras ópticas. A adição de uma corrente elétrica ao fio de cobre o faz aquecer, afetando temporariamente o ambiente das fibras e permitindo registrar a resposta térmica ao aumento da temperatura. O método do aquecimento constitui uma aplicação importante do DFOT e vem sendo objeto de investigação e teste em aplicações bem sucedidas durante os últimos anos, conforme visualizado no (Perzlmaier et al., 2004, Aufleger et al. 2005, Perzlmaier et al., 2006).

O método permite o uso de medições de temperatura distribuídas para identificar regiões com diferentes graus de saturação e estados de infiltração. Uma vez que não depende da presença de gradientes de temperatura naturais, pois é imposto ao sistema um aquecimento, a equipe utilizou o método para controle de fluxo em elementos de vedação que necessitam de uma colocação do cabo muito próximo da superfície.

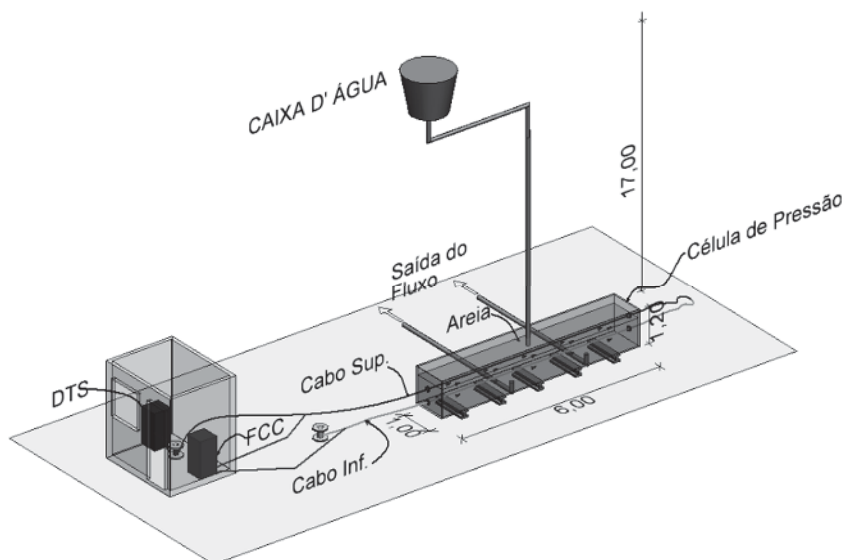
Os autores sugerem que o mesmo período de aquecimento utilizado para a obtenção dos dados de calibração em laboratório seja utilizado para obtenção dos dados de campo, estabelecendo uma relação entre a quantidade de leituras com o período de operação e mesmo com a visualização de alguma anomalia presente nos trechos monitorados.

A equipe envolvida instalou os cabos de forma que seus arredores garantiram um meio onde a resposta térmica é especialmente sensível às condições de infiltração. Desta forma, a magnitude da resposta térmica pode ser correlacionada com a intensidade da infiltração local, e as velocidades de fluxo podem ser estimadas. De acordo com Perzlmaier et al. (2006) este método permite, portanto, medições *in situ* da velocidade de infiltração e pode constituir uma valiosa ferramenta de monitoramento visando a detecção do aumento de fluxo e consequente prevenção de processos de erosão interna.

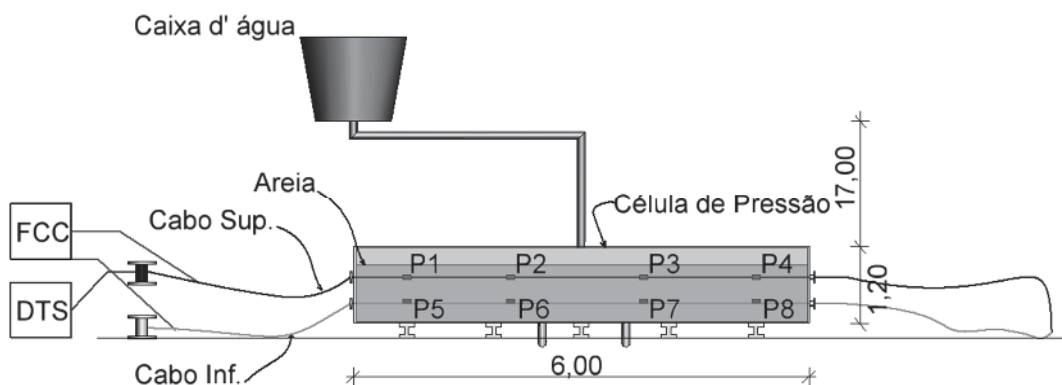
## 2.2 Modelo Experimental

O modelo experimental para a determinação da inter-relação entre a velocidade de fluxo no filtro e o aumento da temperatura está esquematicamente ilustrado nas Figuras 1 e 2. A célula de pressão utilizada tem comprimento de 6,0 m, largura de 1,0 m e altura de 1,2 m. A equipe concebeu a célula em uma estrutura de aço, projetada para manter baixas deformações e suportar o solo compactado no interior da caixa, além de uma coluna de água de até 20 metros (Figuras 3 e 4). Para visualizar seu interior, a caixa apresenta laterais constituídas de um vidro resistente. Além da tampa ser removível, as partes da frente e de trás também podem ser utilizadas para montagem do modelo e compactação do solo. A tampa apresenta perfurações que dividem a vazão de entrada igualmente ao longo da caixa. O fundo da célula de pressão possui dois tubos de drenagem, um a direita e outro à esquerda. A água percolada por eles é guiada para um tubo central onde se localiza um medidor de vazão (Figura 5), aparelho a partir do qual a equipe realizava o controle da vazão aplicada no sistema para cada ensaio. Um registro manual presente na saída do sistema regula o fluxo de entrada de água na célula.

Simulando a situação de campo, a equipe de projeto realizou a compactação do solo arenoso em camadas, com compactidade relativa média de 65% (semelhante à compactidade relativa utilizada para compactação dos materiais granulares do tapete drenante horizontal e filtro vertical da barragem da UHE Colíder). O cabo de fibra óptica utilizado passava pela célula de pressão duas vezes, resultando uma seção de monitoramento no trecho superior e outra no trecho inferior da célula.

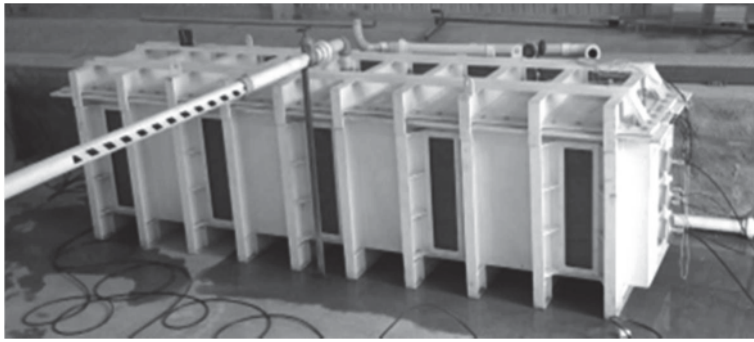


**Fig. 1** – Desenho esquemático 3D do Modelo de Laboratório.

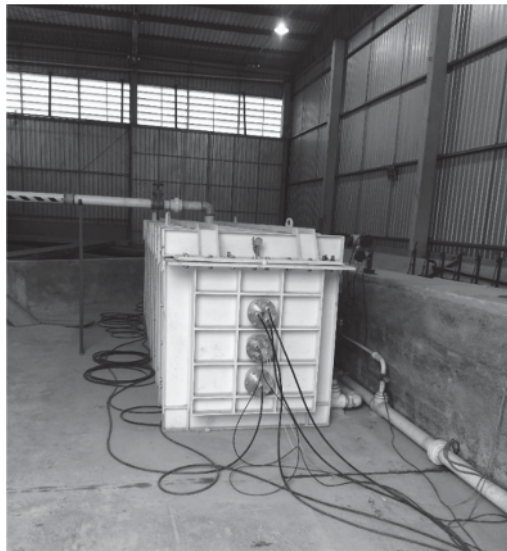


**Fig. 2** – Corte longitudinal do modelo de laboratório.

Complementarmente a essa estrutura, para a obtenção de aproximadamente 17 m de coluna de água que alimentavam o experimento, funcionava um sistema hidráulico. Para união do modelo laboratorial ao sistema hidráulico existente a equipe utilizou alguns acessórios: válvulas e registros instalados para atender diferentes condições de vazão e pressão, medidor de vazão na saída do sistema e recipiente com água para inserção de parte do cabo utilizado na seção de referência (Figura 6). Por questões de segurança e manutenção a equipe instalou o equipamento de leitura (DTS) com computador e a fonte de aquecimento no interior de um container próximo da célula (Figura 7).



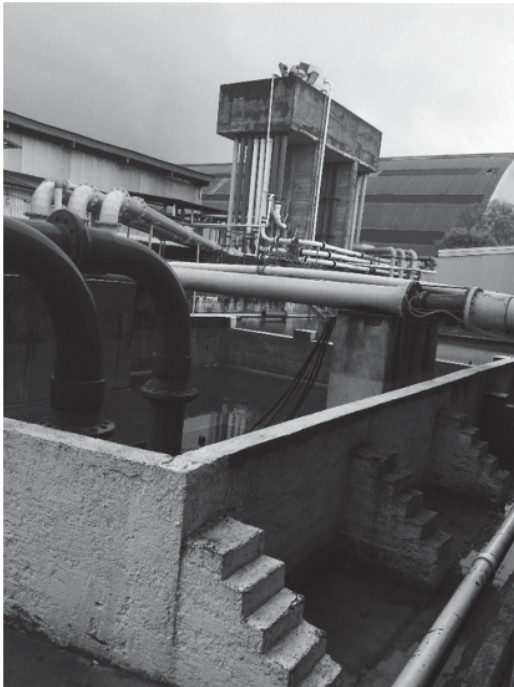
**Fig. 3** – Célula de pressão do modelo experimental.



**Fig. 4** – Vista lateral da célula de pressão.



**Fig. 5** – Medidor de vazão.



**Fig. 6** – Sistema hidráulico do modelo.



**Fig. 7** –DTS e fonte de aquecimento.

### 2.3 Dados DTS

Para a obtenção das medidas de temperatura, foi utilizado o equipamento DTS (*Distributed Temperature Sensing* – Sensor de temperatura distribuída), do fabricante Sensornet, sistema Sentinel. Conforme especificação do fabricante, para sensores similares ao utilizado nessa pesquisa é possível a realização de medições distribuídas de temperatura a uma extensão de até 10 km, sem perdas ópticas, com resolução de aproximadamente 0,1°C de temperatura a cada 1,0202 metros de distância.

De acordo com Pettres et al. (2012) é possível obter temperaturas registradas com tecnologia DTS a partir de pontos distribuídos ao longo do comprimento do cabo de fibra óptica e, dependendo do arranjo estabelecido, estarão entre si a cada metro. De maneira que nesse tipo de leitor a zona de influência de um ponto representa a metade do ponto vizinho à esquerda e à direita.

### 2.4 Sistema de Aquecimento do Cabo

A entrada de calor foi gerada pela aplicação de tensão aos condutores - fios de cobre localizados no interior do cabo. Para tanto a equipe dimensionou as características da fonte de corrente contínua Modelo 900-30-i Suppleir que permite a configuração da potência, corrente e voltagem de maneira independente. A fonte utilizada possui um módulo de potência, possibilitando que os valores programados se mantenham constantes durante todo ensaio. Este controle é importante uma vez que com o aumento da temperatura provocado pela indução de uma corrente e uma voltagem conhecidas nos condutores elétricos do cabo de fibra óptica, a resistência ôhmica tende a diminuir, trazendo oscilações às leituras de temperatura. A fonte de corrente contínua utilizada controla estes parâmetros elétricos automaticamente e os corrige para que a potência se mantenha constante durante todo o ensaio. A Figura 8 ilustra a fonte em questão.



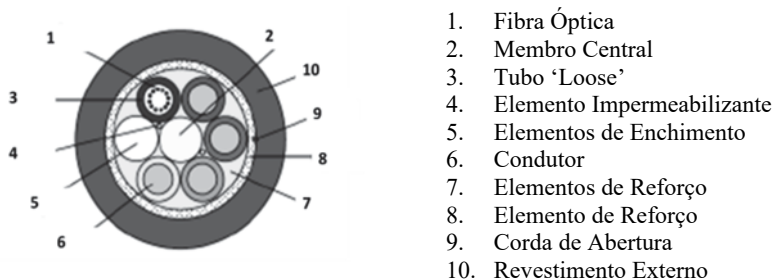


**Fig. 8** – Fonte de aquecimento FCC-900-30-i.

A equipe realizou ensaios com potências de 10, 15 e 20 W/m (Watts por metro de cabo), com o objetivo de avaliar as diferenças e possibilitar a definição do nível mais adequado para as medições em campo. O limite inferior tem por base o descrito no trabalho de Perzlmaier (2007), como valores mínimos para quantificação de fluxo. O valor de 20 W/m foi determinado pela verificação das temperaturas do ensaio em relação às temperaturas máximas estabelecidas na especificação técnica do cabo de fibra óptica, conforme recomendação do fabricante.

## 2.5 Especificação do Cabo de Fibra Óptica

O cabo utilizado nessa pesquisa é do tipo ‘loosebuffer’, composto por quatro condutores rígidos de cobre com 1,5 mm<sup>2</sup> e um cabo contendo 4 fibras ópticas multimodo. O diâmetro interior do tubo de proteção que circunda a fibra óptica ‘buffer’ é significativamente maior que o diâmetro exterior da mesma, sendo possível acomodar várias fibras no mesmo tubo. A malha de cobre desse complexo além de proteger a fibra, permite a aplicação de um estímulo térmico no interior do próprio cabo, conduzindo a energia elétrica quando conectado a uma fonte de potência elétrica, causando o seu aquecimento, de acordo com Perzlmaier et al. (2004). Na Figura 9 vê-se o desenho esquemático da fibra óptica especificada.



**Fig. 9** – Desenho esquemático da fibra óptica utilizada.

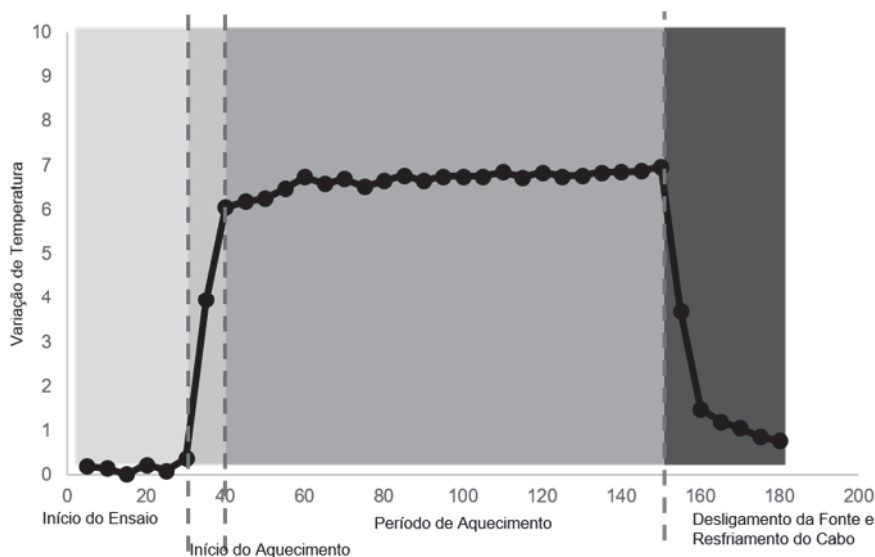
## 2.6 Procedimento de Ensaio

O ensaio realizado para a análise da inter-relação entre a velocidade de fluxo no filtro e a diferença de temperatura para um cabo específico consistiu em vários testes à diferentes velocidades do fluxo com o mesmo procedimento de teste. Antes de iniciar o experimento, a equipe realizou um pré-ajuste com uma velocidade estacionária do filtro dentro da célula de pressão usando o registro e o medidor de vazão instalados no fluxo de saída. O ponto de partida de cada experimento é a

definição de uma distribuição de temperatura estacionária na célula de pressão, o trecho de fibra óptica sem cobre utilizado para controle de temperatura do cabo instalado no solo.

A equipe utilizou medidas de extremidade única para as medições de temperatura da fibra óptica distribuída. O tempo de medição da sensibilidade à temperatura da fibra óptica distribuída foi estabelecido, levando em consideração a precisão de medição e a realização de leituras a cada 5 minutos. Antes de iniciar o aquecimento do cabo, realizaram-se 5 medições de referência.

Após a conclusão da quinta medição de referência (sem aquecimento), o processo de aquecimento era iniciado pela aplicação de tensão ao condutor. Para cada ensaio realizado, o período de aquecimento durou aproximadamente duas horas. Após a gravação de 24 medições (uma a cada 5 minutos), a tensão foi desconectada do condutor. A tensão ao longo de todo o tempo de aquecimento foi mantida constante e monitorada para assegurar a entrada constante de calor. Após desligar a fonte de aquecimento cada ensaio persistiu por mais cerca de 30 minutos (6 medições), para observação do retorno das temperaturas aos valores anteriores ao aquecimento. Terminado esse período o ensaio era encerrado. A Figura 10 apresenta um esquema do ensaio.



**Fig. 10** – Esquema do ensaio (adaptado de Perzlmaier, 2007).

O cabo utilizado no ensaio apresentava 248,09 m de comprimento total. Considerando leitura aproximada a cada 1,02 m, resultam 245 pontos de dados obtidos do equipamento. Desse total, os autores se concentraram em duas seções de particular interesse, o trecho superior e inferior do cabo localizados no interior da célula de pressão. Cada trecho com um comprimento aproximado de 6 m. Para eliminar os efeitos de fronteira, os autores utilizaram nas análises apenas os 4 m centrais de cada seção. A diferença de temperatura entre a medição de referência e a medição de aquecimento foi obtida para cada um dos pontos. Utilizando o valor absoluto de temperatura nesses pontos (ao longo do ensaio) subtraído do valor médio do trecho de fibra óptica inserido no interior da caixa (ao longo do ensaio), os autores obtiveram os valores de variação de temperatura.

Para excluir efeitos de variação térmica da água decorrentes da irradiação solar em parte do sistema (caixas de água e tubulações expostas), a equipe instalou um trecho de cabo óptico sem fio de cobre no mesmo nível do trecho de cabo superior, denominado “referência interna”, como pode ser visto na Figura 11.

A equipe realizou ensaios para quantidades de calor por unidade de comprimento de 10, 15 e 20 W/m. Para cada uma foram variadas vazões de 0 a 2,0 l/s. Considerando a área de 6 m<sup>2</sup> da célula de



pressão, e a equação de Darcy, obtêm-se os dados de velocidade de percolação apresentados no Quadro 1.



**Fig. 11** – Referência de temperatura no interior da célula.

**Quadro 1** – Vazões utilizadas nos ensaios.

Vazão - Q (l/s)	Velocidade de Percolação (m/s)
0	0
0,05	$8,33 \times 10^{-6}$
0,075	$1,25 \times 10^{-5}$
0,1	$1,67 \times 10^{-5}$
0,2	$3,33 \times 10^{-5}$
0,4	$6,67 \times 10^{-5}$
0,5	$8,33 \times 10^{-5}$
0,8	$1,33 \times 10^{-4}$
1,0	$1,67 \times 10^{-4}$
1,2	$2,00 \times 10^{-4}$
1,4	$2,33 \times 10^{-4}$
1,6	$2,67 \times 10^{-4}$
1,8	$3,00 \times 10^{-4}$
2,0	$3,33 \times 10^{-4}$

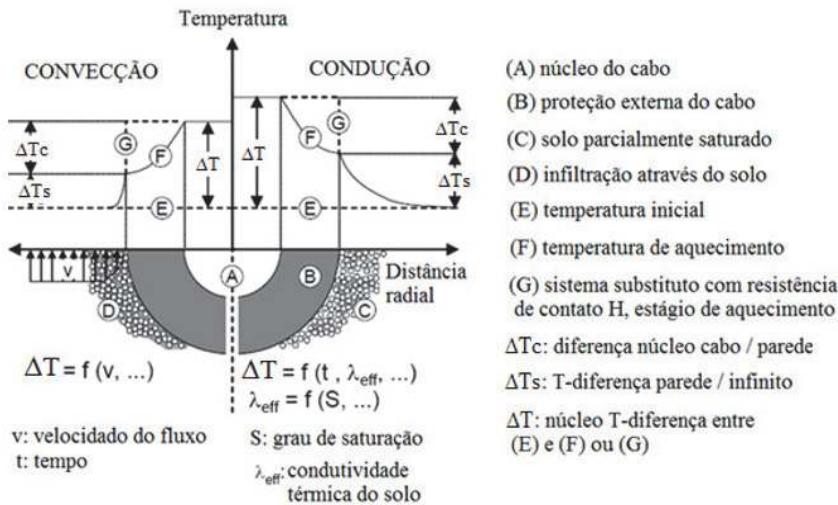
Os autores entendem que as vazões ensaiadas apresentaram uma amplitude suficiente para atender aos valores esperados de vazão na barragem de Colíder. A estimativa de projeto é de uma vazão específica correspondente a 0,1 l/s.m. A vazão máxima ensaiada corresponde a 0,33 l/s.m, três vezes maior que o valor estimado.

### 3 RESULTADOS E ANÁLISE

Este item contempla a fundamentação teórica utilizada como base para as análises, os resultados obtidos nos ensaios de laboratório, realizados num período experimental de 2 anos, bem como as análises realizadas para a obtenção da curva de calibração, que melhor representam a relação entre velocidade de fluxo e variação de temperatura. O detalhamento das análises e o tratamento estatístico são descritos em Pirolli (2017).

#### 3.1 Fundamentação teórica da análise

Conforme Goltz (2012), antes do aquecimento a temperatura do cabo é igual à temperatura do material que o envolve. O aquecimento provoca um aumento na temperatura do cabo se comparado à temperatura do material circundante. O comportamento térmico do cabo aquecido pode ser modelado usando um sistema de substituição constituído por um núcleo de condutividade térmica infinita e uma capa protetora de condutividade térmica finita (Figura 12).



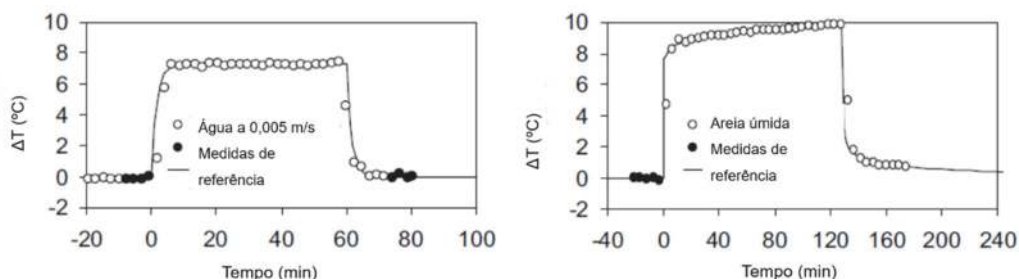
**Fig. 12** – Distribuição de temperatura sobre a seção transversal de um cabo esquemático: convecção à esquerda e condução à direita. (Rocha, 2011).

O solo é uma mistura de sólidos (orgânicos ou minerais), água, vapor e ar. A condutividade térmica do solo da mistura multifásica é geralmente chamada de condutividade térmica efetiva. Ao lado da condução de calor, outros mecanismos de transferência de calor ocorrem no solo caso um gradiente de temperatura de origem ao fluxo de calor.

Conforme descrito por Goltz e Aufleger (2009) quando ocorre infiltração no entorno do cabo, o transporte de calor convectivo supera o transporte de calor condutivo. Devido a este fenômeno o calor do cabo é transportado para fora mais rapidamente e um estado de equilíbrio de temperatura é alcançado. Consequentemente, para um mesmo aquecimento, regiões do cabo em contato com fluxo de água apresentam variações de temperatura menores do que aquelas com fluxo menos intenso ou mesmo sem fluxo de água. Este entendimento é a base para localizar infiltrações no meio utilizando o método do aquecimento.

Ainda segundo Goltz e Aufleger (2009) após um curto período de aquecimento obtém-se uma distribuição de temperatura estacionária. Enquanto a diferença de temperatura  $dT_s$  diminui com o aumento da velocidade do filtro, a diferença de temperatura entre o núcleo e o revestimento do cabo  $dT_c$  permanece constante devido à entrada de calor e ao fluxo de calor constante resultante.

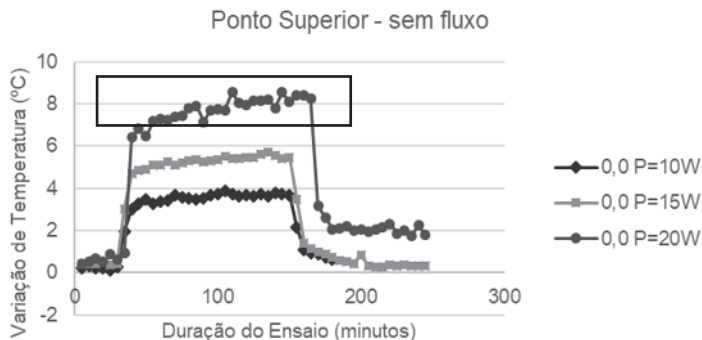
Se não houverem interferências ambientais ou mesmo do sistema de aquecimento, os resultados obtidos em ensaios devem se comportar de maneira semelhante ao apresentado na Figura 13. O aquecimento ocorre rapidamente após ligar a fonte de calor, e a temperatura sofre pequena ou nenhuma variação durante a etapa em que o aquecimento está ocorrendo.



**Fig. 13** – Medidas de temperatura durante um ensaio – método do aquecimento (adaptado de Perzmaier, 2007).

### 3.2 Resultados dos ensaios de laboratório

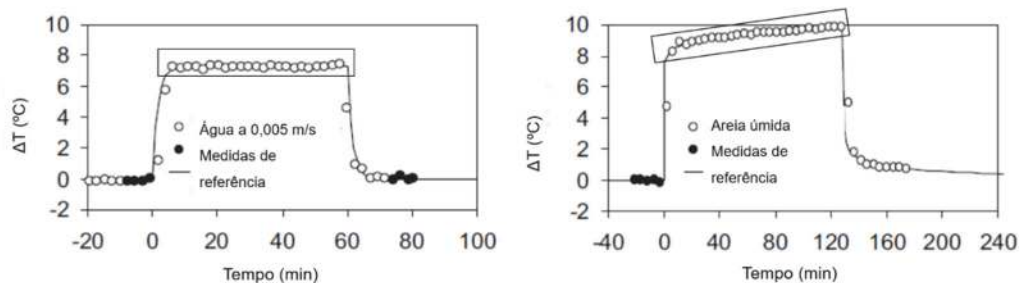
À exceção da Fig. 15, as Figuras 14 a 28 apresentam, para o ponto central do trecho superior de cabo instalado na caixa, os valores comparativos para uma mesma vazão e diferentes potências. As vazões apresentadas são 0,0; 0,05; 0,075; 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 e 2,0 l/s. As potências utilizadas correspondem a 10 W/m; 15 W/m e 20 W/m.



**Fig. 14** – Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências – sem fluxo.

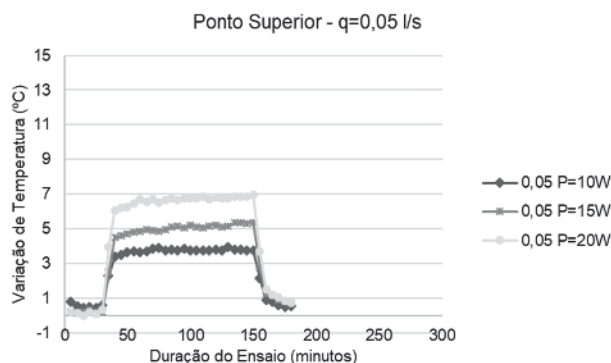
Nesses ensaios a variação de temperatura ficou em torno de 3,5° a 4° para potências aplicadas de 10 W/m, 5° para a potência de 15 W/m e 7,5° para a potência de 20 W/m.

Na Figura 15 chama-se atenção para um aspecto observado no ensaio sem percolação (comparar Figura 14 que representa o resultado obtido em laboratório com a Figura 15 que representa dados de referência bibliográfica), e que não se observa com a presença de fluxo no sistema.

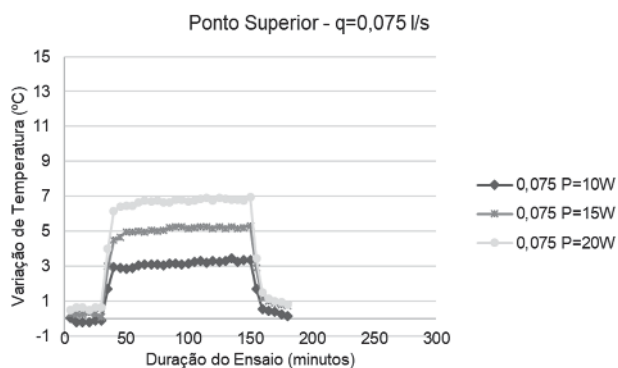


**Fig. 15** – Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento. (adaptado de Perzmaier, 2007).

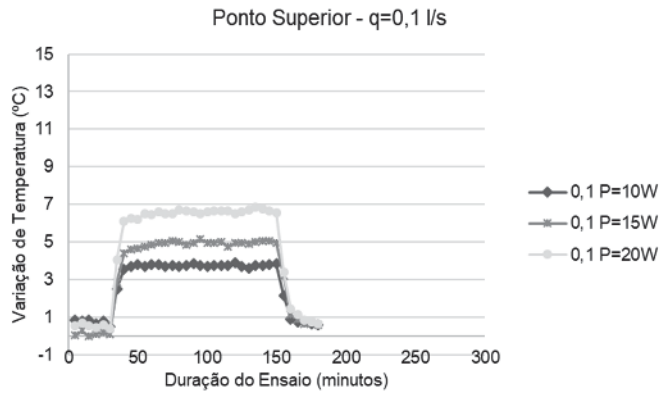
A figura anterior mostra que o trecho aquecido apresenta uma inclinação no ensaio de areia úmida, não visto quando há fluxo. À medida que o fluxo aumenta os pontos no trecho aquecido apresentam uma tendência à linearidade, enquanto os pontos obtidos para ensaios em ambiente saturado, ausente de fluxo, apresentam uma tendência levemente crescente.



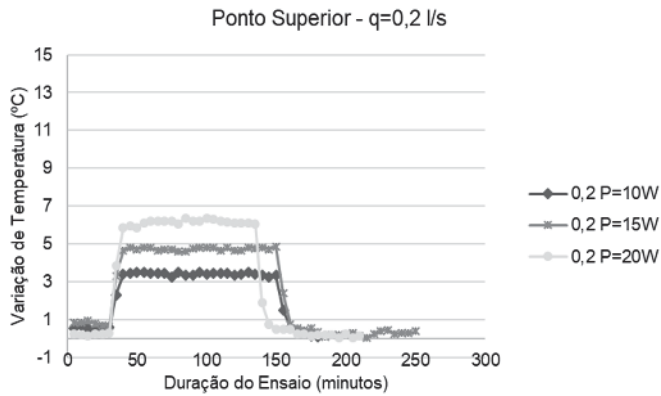
**Fig. 16** – Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=0,05$  l/s.



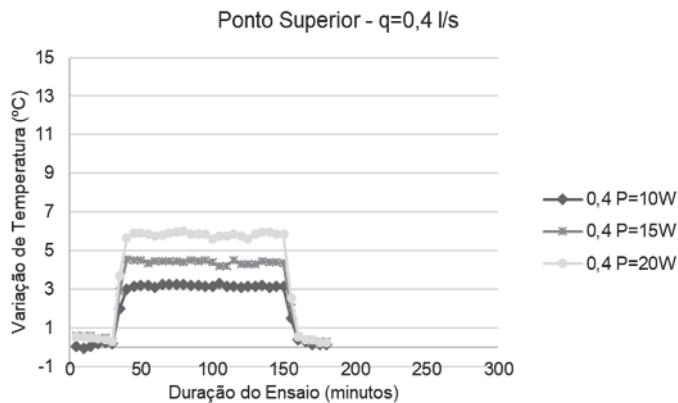
**Fig. 17** – Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=0,075$  l/s.



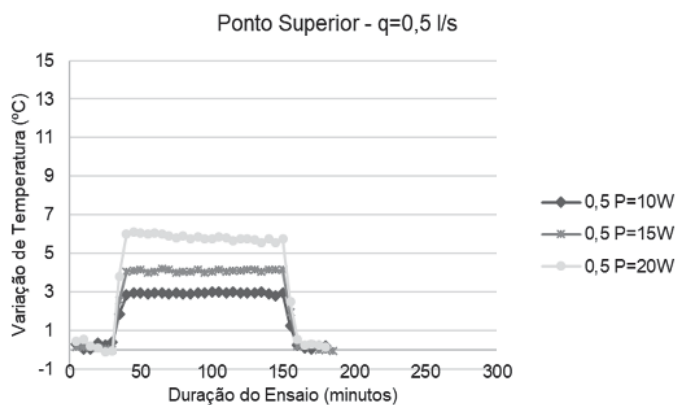
**Fig. 18** – Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=0,1$  l/s.



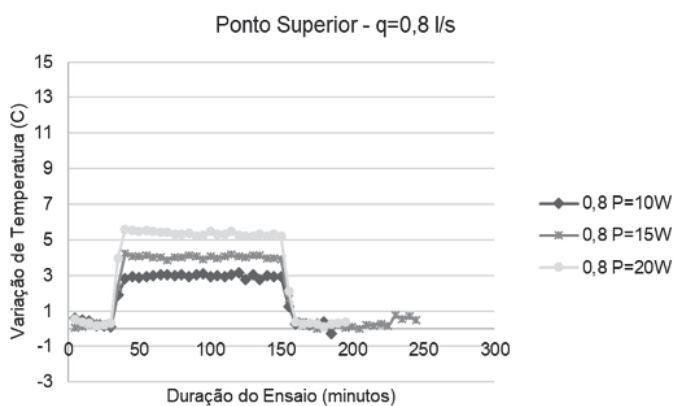
**Fig. 19** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=0,2$  l/s.



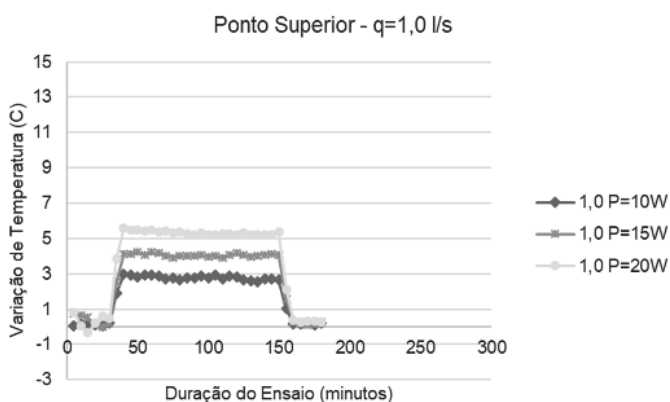
**Fig. 20** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=0,4$  l/s.



**Fig. 21** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=0,5$  l/s.

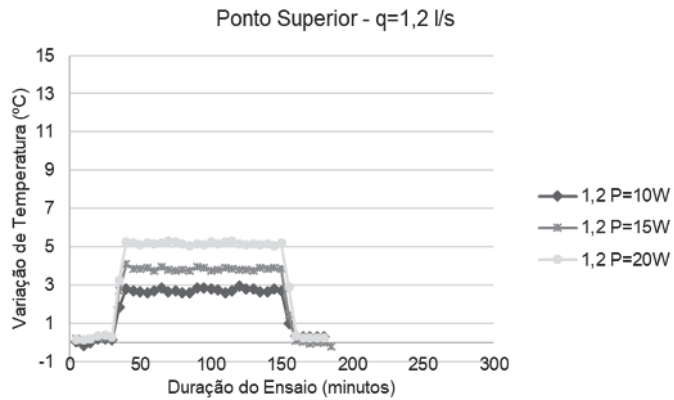


**Fig. 22** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=0,8$  l/s.

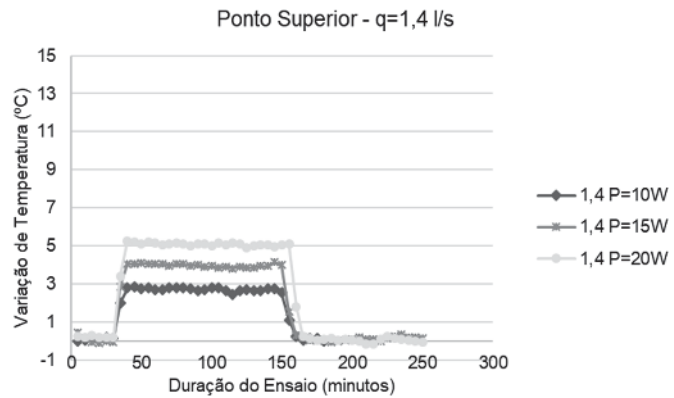


**Fig. 23** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=1,0$  l/s.

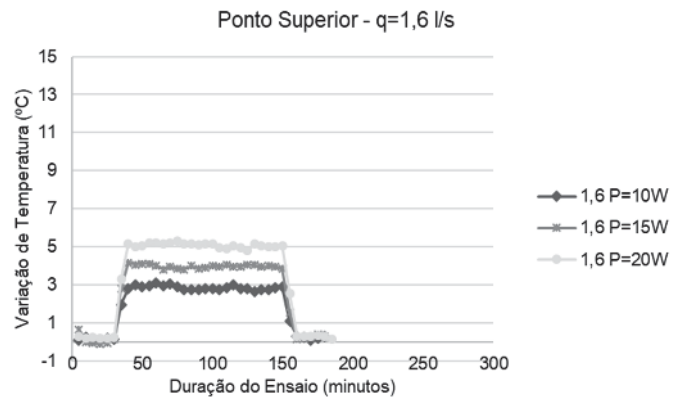




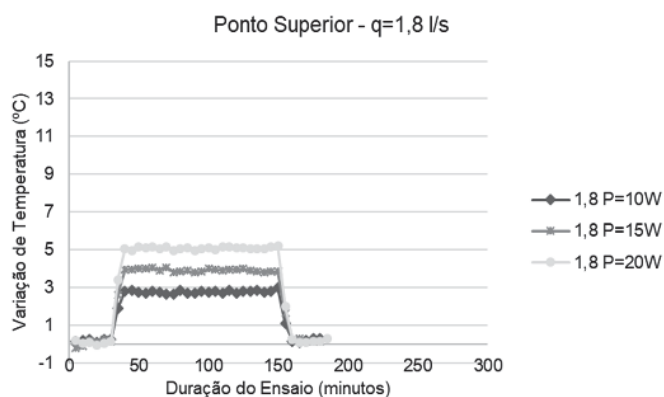
**Fig. 24** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=1,2$  l/s.



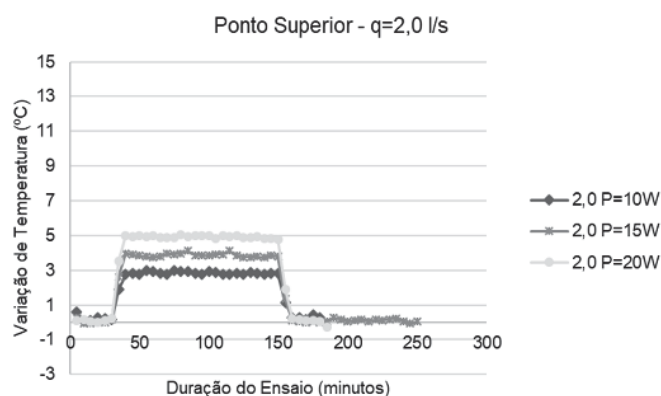
**Fig. 25** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=1,4$  l/s.



**Fig. 26** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=1,6$  l/s.



**Fig. 27** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=1,8$  l/s.

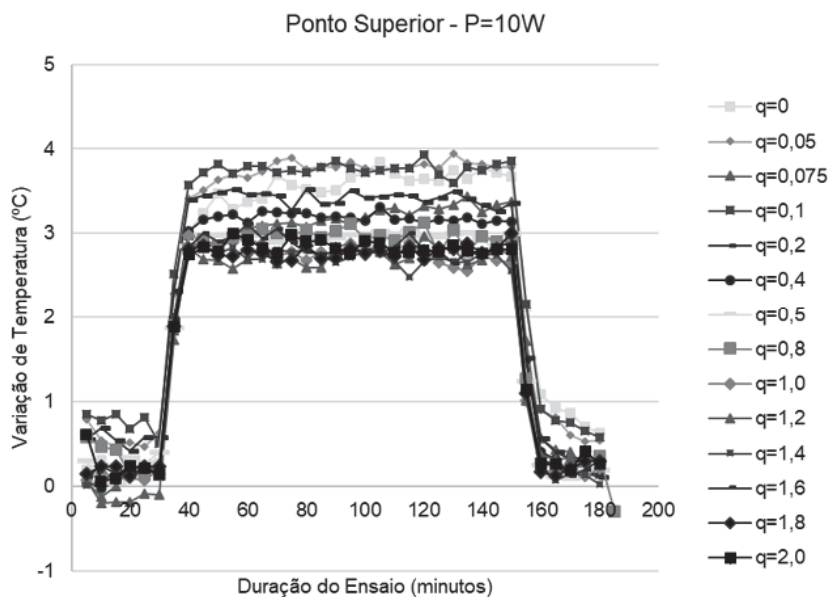


**Fig. 28** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de diferentes potências:  $q=2,0$  l/s.

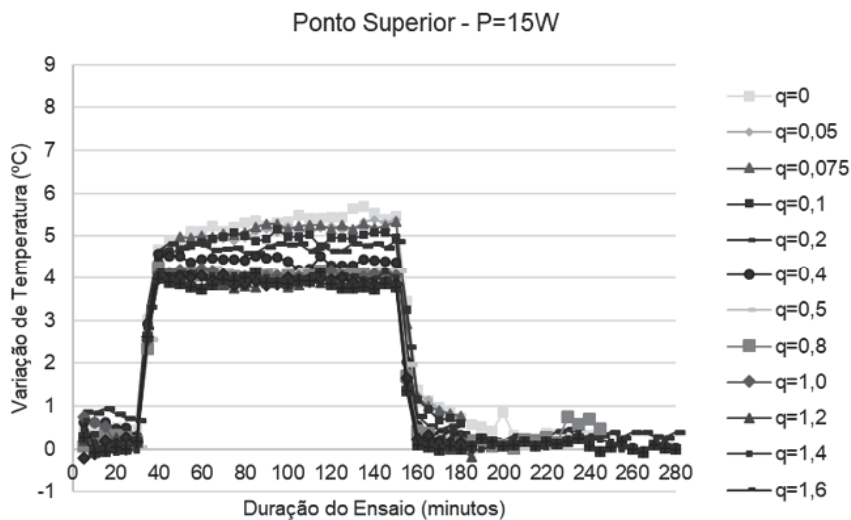
O aspecto mais importante que os autores ressaltam é que os dados apresentam a linearidade física esperada: quanto maior a potência, maiores foram os valores de variação de temperatura obtidos, assim como quanto maior a vazão, menores os valores de variação de temperatura.

Outro fato é que as variações de temperatura da magnitude destas verificadas em laboratório não devem ser encontradas no monitoramento dos cabos da barragem da UHE Colíder, já que mesmo com os cuidados tomados a água da caixa em laboratório apresenta maiores amplitudes de variação que aquelas, prováveis, decorrentes do fluxo de água do reservatório. A água do reservatório especialmente em profundidade, que é a maior área de interesse, não tem apresentado variações de temperatura como as observadas em laboratório.

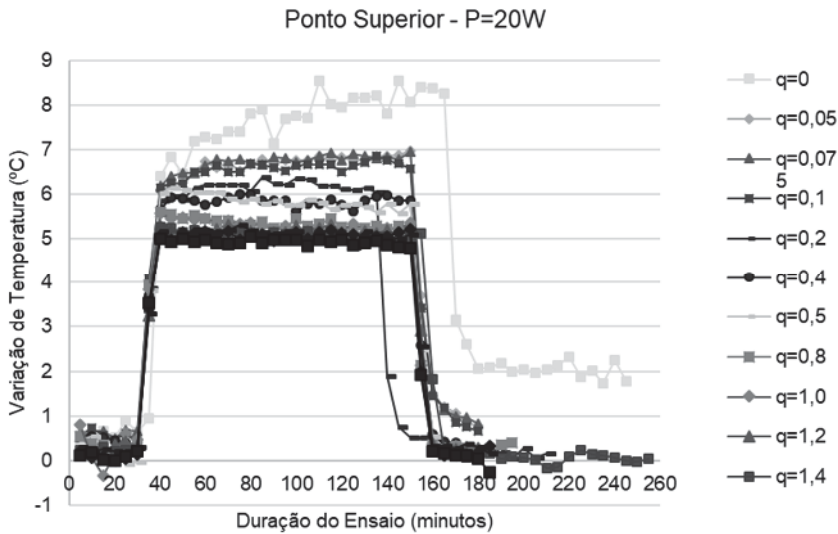
A observação do comportamento das variações de temperatura em relação às vazões para a mesma potência estão nas Figuras 29 a 31.



**Fig. 29** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de vazões para a potência 10 W/m.



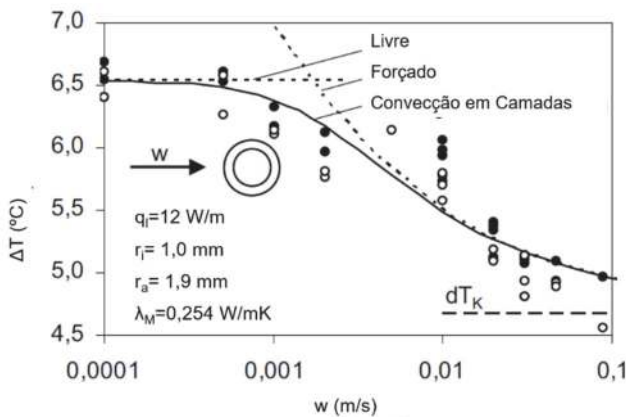
**Fig. 30** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de vazões para a potência 15 W/m.



**Fig. 31** - Medidas de temperatura, ensaio com aquecimento, com comparativo de vazões para a potência 20 W/m.

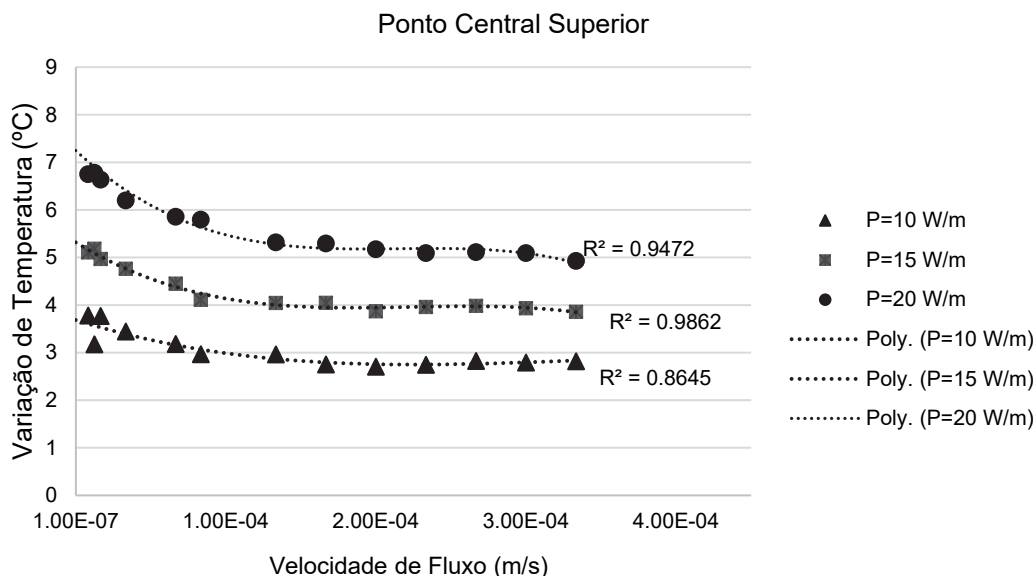
### 3.3 Curva Velocidade de Fluxo versus Temperatura

Pela curva obtida por Perzlmaier (2007), é possível definir as variações de temperatura em função das variações de vazão, e assim monitorar o fluxo ao longo do cabo para uma situação de campo. A Figura 32 apresenta a curva obtida por este autor.



**Fig. 32** - Diferença de temperatura no cabo dependendo da velocidade de infiltração (adaptado de Perzlmaier, 2007).

A partir das vazões e do fluxo de calor por unidade de comprimento impostos para realização dos ensaios, os autores desenvolveram as curvas que relacionam no eixo das abscissas a velocidade de fluxo e no eixo das ordenadas, a variação de temperatura, para as diferentes potências ensaiadas (Figura 33).



**Fig. 33** - Relação da variação de temperatura com velocidade de fluxo.

Os autores consideram os pontos bastante representativos da estimativa de variação de temperatura em relação à velocidade de fluxo. Ressaltam como maior dispersão os valores resultantes de menor potência imposta no aquecimento, e pequenos fluxos de água passando pelo sistema.

Os autores determinaram as curvas utilizando a mediana após tratamento de cada série de dados. A mediana é o valor que separa a metade maior e a metade menor da amostragem. Estando os dados ordenados a mediana se caracteriza pelo valor central. Em relação à média, tem como vantagem dar uma ideia de valor típico sem ser distorcida pelos valores extremos da série de dados.

Como se tratam de ensaios de laboratório onde é quase impossível eliminar todas as variabilidades decorrentes do sistema, os autores definiram a adoção da mediana para melhor representação dos resultados.

Uma vez considerados adequados, os autores compararam os dados da Figura 33 àqueles obtidos por Perzlsmaier analiticamente.

Em geral, solos granulares saturados ou com presença de fluxo podem ser representados como uma mistura de duas fases. Perzlsmaier (2007) utilizou essa abordagem para descrição analítica de uma função  $dT/w_f$  (variação de temperatura/velocidade de fluxo) a partir da sequência de equações descritas que calculam a condutividade térmica de uma mistura de duas fases.

Em seu trabalho, Perzlsmaier (2007) define o incremento de temperatura ( $dT$ ) no cabo de fibra óptica devido ao processo de aquecimento como uma função da velocidade de fluxo no filtro a partir da equação:

$$dT = \frac{q_l}{2 \cdot \pi} \left( \frac{1}{\lambda_M} \cdot \ln \left( \frac{r_{ext}}{r_{int}} \right) + \frac{2}{\lambda_{eff} \sqrt[4]{Nu_{eff}^4 + Nu_{cond}^4}} \right) \quad (1)$$

A condutividade térmica da proteção do cabo ( $\lambda_M$ ), o raio externo ( $r_{ext}$ ) e o raio interno ( $r_{int}$ ) são constantes definidas a partir das especificações técnicas do material. Os valores de condutividade térmica efetiva ( $\lambda_{eff}$ ), é obtido a partir das equações descritas:

$$\lambda_{eff} = \lambda_{fl} \cdot \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{-nw} \quad (2)$$

sendo:

$$nw = 0,280 - 0,757 \cdot \log_{10} \cdot \varepsilon_w + 0,057 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{\sigma}\right) \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{\lambda_s}{\lambda_{fl}} \quad (4)$$

A porosidade ajustada ( $\varepsilon_w$ ) que leva em consideração o efeito de parede depende da relação entre o diâmetro de partícula ( $d_p$ ) e o diâmetro do cilindro ( $D$ ). Calcula-se através da equação:

$$\varepsilon_w = \varepsilon \cdot \left(1 + 0,5 \cdot \left(\frac{d_p}{D}\right)^3\right) \quad (5)$$

O número de Nusselt efetivo, conforme descrito por Perzlmaier (2007), é calculado utilizando a equação a seguir:

$$Nu_{eff} = c_1 \cdot Re_D^{0,5} \cdot Pr_{eff}^{c_2} \cdot (f' \cdot Re_p')^{c_3} \cdot \left[\arctan\left(\frac{D}{d_{eff}}\right)^{0,5}\right]^{c_4} \quad (6)$$

As constantes  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  e  $c_4$  variam de acordo com o regime de fluxo encontrado, e o número de Reynolds ( $Re_d$ ) correspondente. Esses valores podem ser obtidas do Quadro 2 (Fand et al., 1993).

**Quadro 2** - Constantes dependentes do regime de fluxo.

Regime de Fluxo	$Re_d$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
Darcy	<3	1,248	0,3534	0,05355	0,5467
Forchheimer	3 - 100	0,6647	0,2286	0,209	1,417
Turbulento	> 100	0,7956	0,06036	0,2248	1,588

A abordagem teórica assume que para a convecção forçada, a partir de um cilindro em meio poroso, dois componentes de fluxo interferem entre eles: a componente de fluxo macroscópico e a componente de fluxo capilar. A componente de fluxo macroscópico tem fluidos que fluem sem obstrução ao redor de um cilindro podendo ser caracterizada pelo número de Reynolds do cabo:

$$Re_D = \frac{w \cdot D}{\nu_{fl}} \quad (7)$$

O componente de fluxo capilar descreve o movimento sinuoso do fluido através dos poros e pode ser caracterizado pelo número de Reynolds de um meio poroso:



$$Re_p = \frac{w \cdot d_{eff}}{v_{fl}} \quad (8)$$

$$Re'_p = \frac{Re_p}{1 - \varepsilon} \quad (9)$$

Assim como o número de Reynolds do cabo, o valor de  $f'$  é uma função do regime de fluxo do sistema, e das constantes  $k$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $A'$  e  $B'$ :

$$f' = \frac{36 \cdot k}{Re'_p} \quad \text{Darcy; } k=5,34 \quad (10)$$

$$f' = \frac{A}{Re'_p} + B \quad \text{Forchheimer} \quad (11)$$

$$f' = \frac{A'}{Re'_p} + B' \quad \text{Regime Turbulento} \quad (12)$$

sendo os valores de  $A$ ,  $B$ ,  $A'$  e  $B'$  informados no Quadro 3.

**Quadro 3** - Constantes para regimes de fluxo.

Forchheimer	Turbulento
A= 182	A'= 225
B= 1,92	B'= 1,62

Fisicamente, o número de Prandtl representa a razão entre a difusão da quantidade de movimento (velocidades) e a difusão do calor (temperatura). De acordo com Incropera et al. (2008), o valor de Prandtl corresponde a 6,0 para temperaturas em torno de 20°C.

A função para obtenção do valor  $dT$  leva em conta ainda a determinação do Nusselt de convecção natural. Conforme Incropera et al. (2008), como as velocidades em escoamentos de convecção natural são em geral muito menores do que aquelas associadas à convecção forçada, as taxas de transferência por convecção correspondente são também menores.

A convecção natural está associada ao transporte de calor decorrente das diferenças de densidade no fluido desde que estas ocorram por gradientes de temperatura. Para a determinação da mesma é necessário conhecer os valores de temperatura da água em contato com o cabo e do próprio cabo. A equipe não monitorou estes valores durante a realização dos ensaios, assim, a equação utilizada desconsidera a parcela de convecção natural, tendo-se:

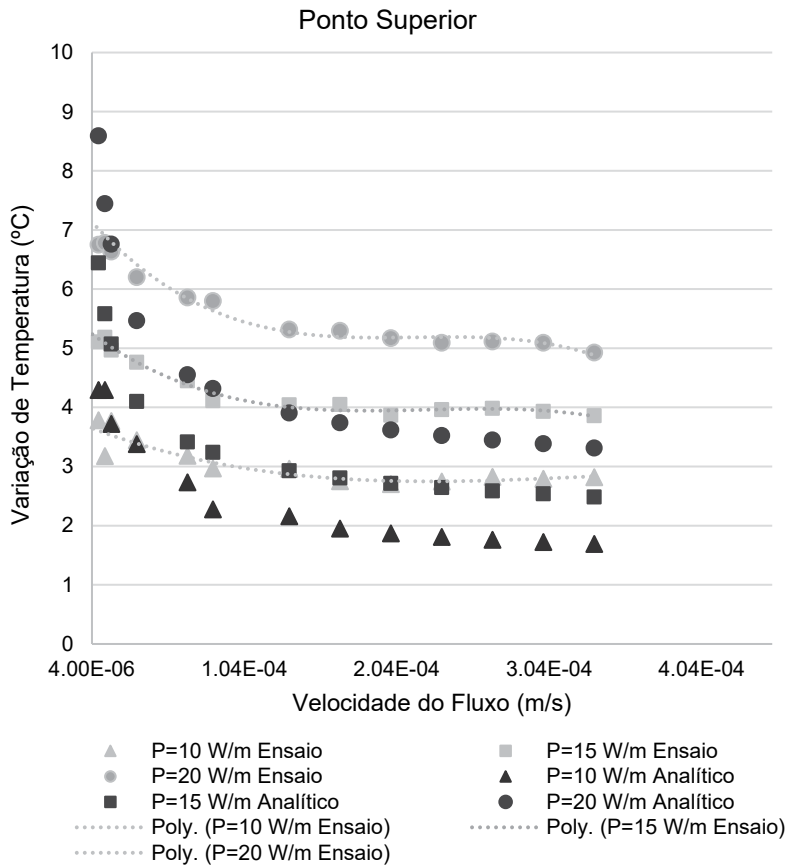
$$dT = \frac{q_l}{2 \cdot \pi} \left( \frac{1}{\lambda_M} \cdot \ln \left( \frac{r_{ext}}{r_{int}} \right) + \frac{2}{\lambda_{eff} \cdot Nu_{eff}} \right) \quad (13)$$

Para a determinação do  $dT$  em cada velocidade de fluxo e potência alterada os autores utilizaram os valores demonstrados no Quadro 4.

**Quadro 4 - Dados utilizados na determinação da função  $dt \times w$ .**

Símbolo	Valor Considerado	Definição	Unidade
Ql	10	fluxo de calor por unidade de comprimento	W/m
Pi	3,1416	constante	
lamb.m	0,1700	condutividade térmica da proteção do cabo	W/(m.k)
r.ext	0,0085	raio externo	m
r.int	0,0075	raio interno	m
lamb.eff	1,0959	condutividade térmica efetiva	W/(m.k)
Nu.eff	0,9300	Nusselt efetivo	-
Nu.cond	0,0000	Nusselt convecção natural	-
lamb.s	1,7000	condutividade do solo	W/(m.k)
lamb.fl	0,5800	condutividade do fluido	W/(m.k)
Nw	0,5917	fator	-
Sigma	2,9310	razão de condutividades	-
Ew	0,4120	porosidade ajustada	-
E	0,4120	porosidade	-
Dp	0,0004	diâmetro da partícula	m
D	0,0170	diâmetro do cilindro	m
Keff	0,0261	difusividade térmica efetiva	m <sup>2</sup> /s
S	1	grau de saturação	-
Pfl	1000	densidade do fluido	kg/m <sup>3</sup>
cp,fl	0,0420	calor específico de aquecimento do fluido	J/(kg.K)
Ps	2660	densidade das partículas sólidas	kg/m <sup>3</sup>
cp,s	0,0084	calor específico de aquecimento do solo	J/(kg.K)
c1	1,2480	constante 1 tabela	-
ReD	0,0794	número de Reynolds do cilindro	-
Preff	6	número efetivo de Prantl	-
c2	0,3534	constante 2 tabela	-
f	4012,7559	coeficiente de fricção adimensional	-
Re'p	0,0318	Número de Reynolds da partícula	-
c3	0,0536	constante 3 tabela	-
D	0,0170	diâmetro do cilindro - cabo	m
Deff	0,0040	diâmetro efetivo da partícula	m
c4	0,5467	constante 4 tabela	-
W	0,0000	velocidade do fluxo	m/s
Vfl	0,0000	viscosidade cinemática	m <sup>2</sup> /s
Rep	0,0187	Número de Reynolds da partícula	-
f	4012,7559	Regime de Darcy	-
f	5732,6291	Regime Forchheimer	-
f	7086,2778	Regime Turbulento	-
dT	4,2951	variação de temperatura	

A Figura 34 apresenta os dados de ensaios de laboratório e dados obtidos analiticamente, para as três potências ensaiadas.



**Fig. 34** - Resultados de ensaio x resultados analíticos.

Os dados da Figura 34 mostram que o comportamento obtido experimentalmente é muito próximo do inferido analiticamente. No entanto, nota-se um degrau correspondente a mais ou menos 1°C entre o valor analítico e o valor de laboratório. No entendimento dos autores é provável que as diferenças especialmente para os pontos de menor fluxo estabelecido resultem da parcela de convecção natural desconsiderada, que deve resultar numa diminuição dessas variações para os pontos de menor vazão.

Em relação aos dados que refletem resultados dos ensaios de maior fluxo, é possível que, as diferenças entre laboratório e a metodologia analítica também resultem da adoção de valores que podem sofrer pequenas variações e refletir na diferença visualizada na figura. Outro aspecto bastante relevante é que grande parte das equações de transferência de calor são obtidas empiricamente, considerando-se razoável o resultado experimental diferir do resultado analítico em pequenas escalas.

### 3.4 Equações para determinação do fluxo ou da variação de temperatura

Uma vez validados os dados de ensaios, o Quadro 5 apresenta, para cada potência ensaiada, as equações para determinação da variação de temperatura em função da velocidade de fluxo e o respectivo valor de coeficiente de determinação.

**Quadro 5** - Equações de variação de temperatura em função da velocidade de fluxo para as diferentes potências.

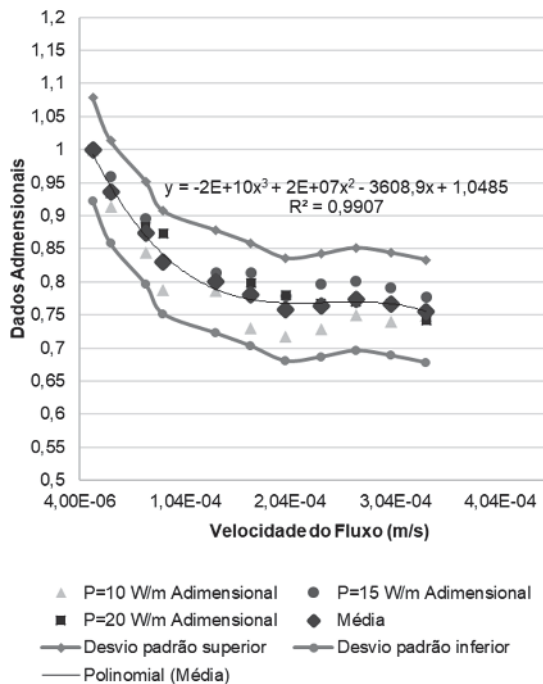
Potência (W/m)	Equação (temperatura em função da velocidade de fluxo)	R <sup>2</sup>
10	$dT = -3E + 10w^3 + 3E + 07w^2 - 9979,6w + 3,6875$	0,864
15	$dT = -1E + 11w^3 + 9E + 07w^2 - 19436w + 5,3184$	0,986
20	$dT = -3E + 10w^3 + 1E + 08w^2 - 29372w + 7,2507$	0,947

Dentre várias possibilidades de regressão pesquisadas, os autores optaram pela adoção de equações polinômiais que levaram ao menor coeficiente de determinação R<sup>2</sup>.

### 3.5 Adimensionalização dos dados

Para melhor interpretação dos resultados obtidos a partir dos ensaios de laboratório, os autores realizaram adimensionalização dos dados de variação de temperatura demonstrados na Fig. 33 em função do maior valor.

Dos dados adimensionalizados foi determinado o valor da média, e a partir da média um valor de desvio padrão. A média adicionada ao desvio padrão define uma envoltória superior, enquanto que a média subtraída do desvio padrão define uma envoltória inferior. Os resultados encontram-se na Figura 35.



**Fig. 35** - Envoltória dos dados adimensionalizados.

A partir dos dados apresentados na Figura 35 é possível obter valores de velocidade de fluxo em função das variações de temperatura, independente da potência aplicada durante a realização de uma leitura pelo método do aquecimento. É importante que estes dados sejam utilizados apenas

como um indicativo ou estimativa inicial, dadas as limitações tanto de variação de potência aplicada, como do fato de pequenas variações de temperatura estarem relacionadas a grandes variações de fluxo.

#### 4 CONCLUSÕES

De acordo com Aufleger et al. (2005), por vários anos a realização de medições de temperatura utilizando fibra óptica tem sido considerada uma ferramenta bem estabelecida para detecção e localização de fluxo em barragens de terra. O princípio de medição dos sistemas de monitoramento usando fibra óptica distribuída baseia-se nas propriedades sensíveis à temperatura das fibras, que representam tanto o sensor como o condutor do sinal medido.

A distribuição de temperatura ao longo do cabo de fibra óptica e o desenvolvimento da temperatura ao longo do tempo são medidos e registrados por meio de um sistema de detecção de temperatura distribuída, que consiste em um laser poderoso e uma unidade de processamento de avaliação óptica. O aquecimento adicional do cabo de fibra óptica, aplicando tensão nos fios de cobre, que estão integrados no cabo, fornece informações adicionais e permite distinguir ambientes secos, saturados ou presença de fluxo no entorno do cabo.

Uma vez que a equipe de projeto instalou a fibra óptica, para essa condição específica, no sistema de drenagem da barragem, e considerando que para o regime permanente de fluxo o ambiente estará saturado ou em presença de fluxo, a equipe avaliou o comportamento dos ensaios de laboratório para condição de solo saturado e de presença de fluxo.

Os autores realizaram tratamento estatístico dos resultados dos quarenta e dois diferentes ensaios analisados e utilizados na determinação de curvas de obtenção da variação de temperatura ( $dT$ ) em função da velocidade de fluxo ( $w$ ). Posteriormente, esses valores foram comparados à abordagem analítica desenvolvida no trabalho de Perzlmair (2007). Os valores obtidos se mostram satisfatórios, dentro das possíveis diferenças que valores calculados empiricamente podem ter em relação aos valores obtidos experimentalmente.

Em conjunto com o entendimento dos detalhes de projeto da barragem da UHE Colíder, e com a observação da instrumentação convencional, as equações desenvolvidas a partir dos ensaios de laboratório, devem permitir que se estabeleçam ordens de grandeza para as variações do fluxo no interior do tapete drenante horizontal e filtro vertical da barragem da UHE Colíder.

Os dados de leituras em campo necessariamente devem ser coletados também com a presença de uma referência de temperatura para a obtenção adequada de valores de variação em relação a valores absolutos de temperatura. Deve-se buscar permanecer nos intervalos de potências ensaiadas no laboratório, ou realizar novos ensaios para as potências testadas em campo.

Na impossibilidade de realização dos ensaios dentro dos mesmos valores de potência determinados em laboratório, é possível utilizar os resultados adimensionais, dentro dos valores médios, ou ainda das envoltórias inferior e superior definidas.

É importante notar também que para valores maiores de velocidade de fluxo as variações de temperatura diminuem, ou seja, um grau pode significar um grande aumento de vazão, por isso num primeiro momento os dados devem ser observados de maneira holística, preferencialmente correlacionando o comportamento com aquele observado na instrumentação convencional.

Nos últimos anos, o método do aquecimento demonstrou sua funcionalidade para monitorar a estanqueidade da superfície vedante em muitos projetos de barragens em todo o mundo (Aufleger et al., 2005). No âmbito de vários projetos de pesquisa, esse método tem sido constantemente aprimorado e levou a uma maneira distribuída nova de determinação do grau de saturação e das velocidades de fluxo nos solos.

O método do aquecimento tem sido objeto de outros projetos de pesquisa e também de recomendações da Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD). Não foram encontrados resultados de outras aplicações em barragens de terra que definam valores de vazão resultantes do monitoramento por fibra óptica a partir do método do aquecimento.

Conforme Aufleger et al. (2008), a maioria dos problemas de fluxo presentes na engenharia hidráulica pode ser localizada por meio de medições de temperatura, nas quais o método distribuído tem inúmeras vantagens em comparação com outros métodos. Além disso, o aprimoramento do método de aquecimento fornece informações sobre o movimento da água de infiltração no entorno do cabo aquecido, aumentando as aplicações no âmbito de monitoramento da funcionalidade dos elementos de vedação, bem como a estabilidade geostática e hidráulica em barragens ou outras estruturas hidráulicas. Assim, uma qualidade fundamentalmente nova no monitoramento da segurança de uma barragem de aterro é alcançada.

Mundialmente o método já está em aplicação como demonstrado nos trabalhos de Aufleger et al. (2005 e 2007). Não são apresentados resultados quantitativos nesses trabalhos. No Brasil o primeiro caso de utilização do método do aquecimento para quantificar e detectar fluxo em barragens de terra é a barragem da UHE Colider. Não é possível afirmar a auto suficiência dos ensaios de laboratório na determinação da vazão no trecho de barragem onde foi instalado o cabo. Mas é minimamente possível avaliar presença de anomalias e, com alguma sequência dos trabalhos, alcançar alguma precisão nos resultados de vazão.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Copel Geração e Transmissão pelo investimento em inovação a partir de projetos de pesquisa, estendendo os cumprimentos aos profissionais envolvidos no desenvolvimento desse projeto. Também agradecem aos Institutos Lactec pela dedicação no desenvolvimento dessa pesquisa e pelo fornecimento dos dados de ensaios de laboratório utilizados como base para esse trabalho.

## 6 REFERÊNCIAS

- Aufleger, M.; Conrad, M; Strobl, T.; Malkawi, A.I.H; Duan, Y. (2003). *Distributed Fibre Optic Temperature Measurements in RCC-Dams in Jordan and China*. Simpósio Internacional de Barragem de Concreto Compactado com Rolo, p. 401-407, Madrid.
- Aufleger, M.; Conrad, M.; Perzlmaier, S.; Porras, P.; 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.; Conrad, M.; Goltz, M. (2007). *Distributed fiber optic temperature measurements – a competitive alternative for temperature monitoring in large RCC dams*. In: Proceedings of the 5th International Symposium on RCC Dams, Guiyang, China, November 2-4.
- Aufleger, M.; Goltz, M.; Perzlmaier, S.; Dornstädter, J. (2008). *Integral Seepage Monitoring on Embankment Dams by the DFOT Heat Pulse Method*. First International Conference on Long Time Effects and Seepage Behavior of Dams.
- Fand, R. M.; Varahasamy, M.; Greer, L. S. (1993). *Empirical correlation equation for heat transfer by forced convection from cylinders embedded in porous media that accounts for wall effects and dispersion*. Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 36, pp. 4407-4418.
- Glisic, B.; Inaudi, D.; Kronenberg, P.; Vurpillot, S. (1999). *Dam Monitoring Using Long SOFO Sensor*. In Proceedings of the Hydropower into Next Century, Gmunden, Austria; pp. 1–9.
- Goltz, M.; Aufleger, M. (2009). *Distributed fiber optics temperature measurements using the heat-up method – laboratory tests to determine progression of the wet front*. Relatório apresentado no encontro entre a Universidade de Innsbruck e LACTEC.



- Goltz, M. (2012). *Contribution to monitoring of embankment dams by means of distributed fiber optic measurements*. Universität Innsbruck: Forum Umwelttechnik und Wasserbau, Innsbruck University Press.
- Incropera, F.P.; Dewitt, D.P.; Bergman, T.L.; Lavine, A.S. (2008). *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 643p, 6ª Edição.
- Koga, H.; Katahira, H.; Kawano, H. (2003). *Thermal measurement and analysis of large roller compacted concrete dams*. Simpósio Internacional de Barragem de Concreto Compactado com Rolo, p. 1139-1148, Madrid.
- Perzlmaier S.; Aufleger, M.; Conrad, M. (2004). *Distributed fiber optic temperature measurements in hydraulic engineering - prospects of the heat-up method proceedings*, 72 Annual Meeting of the International Commission on Large Dams (ICOLD), Seoul, Korea, 16.-22.
- Perzlmaier S.; Aufleger, M.; Conrad, M. (2006). *Integral seepage monitoring on open channel embankment dams by the DFOT heat pulse method*. XXII Congress of the International Commission on Large Dams, Barcelona.
- Perzlmaier, S. (2007). *Verteilte filtergeschwindigkeitsmessung in staudämmen. lehrstuhl und versuchsanstalt für wasserbau und wasserwirtschaft*, Technische Universität München, Bericht.
- Pettes, R.; Rocha, R. P. O.; Lacerda, L. A. (2012). *Metodologia para a determinação de nível de água com monitoramento através de fibras ópticas*. VIII Simpósio sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Porto Alegre.
- Pirolli, C. (2017). *Medidas Distribuídas de Fibra Óptica para o Monitoramento de Vazões em Barragens de Terra – Estudo Laboratorial aplicado ao Caso da UHE Colíder*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Construção Civil. Curitiba.
- Rocha, R. P. O. (2011). *Instrumentação geotécnica com fibra ótica: monitoramento de frente de umedecimento e análise da variação do grau de saturação em solos arenosos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Construção Civil.
- Watley, D.; Johansson, S. (2005). *Optical allusions*. International Water Power and Dam Construction, p. 22-25.