

Monitoramento de poropressões construtivas

Porepressure monitoring during construction

Lorena Romã Penna

MSc, Ministério da Integração Nacional,
Brasília/DF, Brasil.

lorena.penna@integracao.gov.br

Waldyr Lopes de Oliveira Filho

PhD, Universidade Federal de Ouro Preto,
Ouro Preto/MG, Brasil.

waldyr@em.ufop.br

Resumo

Em obras de terra, onde as poropressões construtivas são condicionantes de projeto, é fundamental o uso de instrumentação de campo, de forma a se evitarem incidentes ou riscos à segurança das estruturas. Nesse contexto, apresentam-se, no artigo, testes de laboratório e de campo com uma sonda piezométrica conhecida como Levelogger®, originalmente usada para medir pressão de fluidos em tanques e que foi adaptada para uso em solos. Esse instrumento foi, depois, usado com sucesso numa aplicação prática de obra geotécnica. Ambos os testes foram realizados de forma inovadora e o Levelogger® provou ser uma excelente opção para medição de poropressões em eventos que demandam tempo de resposta rápido e facilidade de operação.

Palavras-chave: Poropressão construtiva, instrumentação de campo, sonda piezométrica.

Abstract

In earthworks where construction porepressures are a conditioning design factor, field instrumentation becomes essential in order to avoid incidents or risks to the structure's safety. In this context, this article presents the laboratory and field tests performed with a piezometer probe known as Levelogger®, originally developed for fluid pressure measurement in tanks and which was modified for use in soils. This device was then used with success in a practical geotechnical application. Both tests were conducted in an innovative manner and the Levelogger® proved to be an excellent alternative for measuring porepressures in events which require quick response and easy operation.

Keywords: Construction porepressures, field instrumentation, piezometric probe.

1. Introdução

Construções de aterros sobre solos moles e, também, em solos granulares saturados, em condições não drenadas, têm como condicionante de projeto, muitas vezes, os excessos de poropressão, gerados no terreno pelos carregamentos impostos pela obra, representando um grande desafio para a estabilidade dessas estruturas.

Nesses casos, o período construtivo é uma fase crítica, na qual não é incomum se estar diante de instabilidades pequenas ou grandes, que trazem,

no mínimo, muito desconforto para a equipe de trabalho, senão, também, instabilidades para outras estruturas porventura existentes no local (Penna, 2008). Isto remete para a importância e a necessidade de se implementar o “construir com segurança”.

Nesse sentido, o monitoramento e o controle das poropressões permitem avaliar o comportamento da obra face ao que foi previsto na fase de projeto, bem como detectar situações anormais que poderiam levar a níveis de alerta e de pré-

ruptura durante a execução da mesma, a despeito da existência de um projeto executivo. Em determinadas situações, esses registros implicam tomada de decisões em tempo hábil, de forma a se evitarem incidentes ou até mesmo riscos quanto à segurança do empreendimento.

Para medição de poropressões, no solo, dispõe-se, no mercado, de alguns instrumentos, entre eles os piezômetros de Tubo Aberto (Casagrande), o pneumático, o elétrico, o hidráulico e o de fibra ótica. Cada um deles apresenta vantagens e desvantagens, como, por exemplo: os casagrandes são de extrema simplicidade e baixo custo, mas tem um

tempo de resposta muito grande, dependendo do meio onde estão inseridos; os pneumáticos tem tempo de resposta rápido, mas as leituras não são instantâneas; os elétricos possuem muitas vantagens, mas têm custo elevado.

Nesse contexto e na intenção de contribuir para os esforços de monitoramento de poropressões construtivas, mostram-se, no artigo, os testes e trabalhos inovadores realizados com uma sonda piezométrica munida de um datalogger interno, de uso comercial para monitoramento de fluidos contidos em tanques ou reservatórios, conhecida como levellogger®.

2. Levelloggers

Os levelloggers e sondas similares são medidores automáticos de nível de fluidos que incorporam, em um corpo selado de aço inoxidável, sensores de pressão e temperatura da água, coletor de dados (datalogger interno) e bateria interna com vida útil estimada em até 10 anos, para uso remoto da sonda, se necessário. O corpo cilíndrico, que aloja os sensores, funciona como um cone geotécnico, permitindo sua cravação no terreno.

Os diversos modelos que existem variam em termos de faixa de pressão, resolução, quantidade de dados armazenáveis na memória e material de revestimento, existindo até versão com revestimento de zircônio, que oferece maior resistência à corrosão.

Para a coleta de dados, estão disponíveis alguns recursos de programação de leitura de dados para intervalos de tempo constantes e variáveis, e por evento. Além disso, através da aplicação de software em computadores portáteis, permitem-se a imediata coleta de dados, a visualização de gráficos e a exportação para planilhas ou bancos de dados.

O monitoramento com o levellogger pode ser feito de forma indireta ou direta. A forma indireta refere-se a situações de monitoramento remoto, onde o aparelho é deixado no local para registro de dados ambientais

e, depois de um tempo, determinado, remove-se o aparelho e procede-se o descarregamento dos dados em um computador. É possível, também, a opção pelo monitoramento em tempo real, através do qual e por meio de um cabo de comunicação entre o levellogger e um periférico de leitura, que pode ser um computador portátil, os dados podem ser vistos, registrados e recuperados do levellogger a qualquer momento. Vale destacar que, aparentemente, não há limitação de comprimento do cabo de comunicação direta, o que permite a manutenção de uma estação de monitoramento no entorno da obra em tempo integral.

A Figura 1 mostra os acessórios necessários para a comunicação direta e um dos modelos de sonda utilizados na pesquisa, o Levellogger Junior F15/M5. Esse modelo fornece uma alternativa de baixo custo para a medição de nível de fluidos (água), com faixa de operação de até 8 m de coluna d'água, com precisão de 0,1% FS (fundo de escala) e calibração de fábrica permanente. Outras características técnicas incluem, bateria de 5 anos, memória não-volátil com capacidade de 32.000 posições de temperatura e pressão de fluido e intervalo de leitura definido pelo usuário entre 0,5 segundos e 99 horas.

O levellogger, originalmente con-

A motivação para utilização da sonda, em trabalhos geotécnicos, partiu dos estudos preliminares feitos por Penna (2007) e Oliveira-Filho et al. (2002), que utilizaram o levellogger para monitorar poropressões em depósitos de rejeitos de mineração, com bons resultados. No entanto, os testes feitos por eles foram limitados, em termos de desenvolvimento da aplicação e sua extensão, restringindo-se a perfuração de poropressões dentro de uma camada de rejeito fino de pequena espessura para acompanhamento da evolução do processo de adensamento por peso próprio.

cebido para medida de nível de fluidos em tanques, teve que ser adaptado para o uso em depósitos de rejeito fino de mineração (lama), em contato direto com o meio envolvente. Penna (2007) usou papel-filtro envolvendo a peça com bons resultados em testes, em um tanque de lama para monitoramento de adensamento.

Para situações em que o levellogger tivesse que ser introduzido em um depósito de solo e lá permanesse por vários dias monitorando a construção de uma obra e seu período pós-construção, questionou-se que o papel filtro não seria suficientemente resistente. A solução definitiva encontrada para um material filtrante foi a introdução de uma pedra porosa entre o elemento de medida (sensor) e o meio circundante.

Foram confeccionadas, então, pedras porosas, a partir de pedras de esmeril, lapidadas em forma de um tarugo, com cerca de 3,5 mm de diâmetro e 4 cm de comprimento, de modo que as mesmas se encaixassem perfeitamente nos orifícios do levellogger (Figura 1), sem trincar ou esfarelar.

As pedras porosas lapidadas precisam de ser saturadas no laboratório com água deaerada, através da aplicação de vácuo em uma câmara de saturação e, então, introduzidas nos dispositivos de medição.



Figura 1
Levellogger Júnior (dimensões: 7/8" x 5,5", peso: 154 g) e acessórios para comunicação direta.

3. Testes com o levellogger

Em laboratório

O teste constou da observação do desempenho do conjunto levellogger/pedra porosa em três meios distintos: água, rejeito silto-argiloso e rejeito silto-arenoso. Tinha-se, por objetivo, analisar questões como saturação da pedra porosa, tempo de resposta e desempenho do aparelho, em cada um dos tipos de solo de interesse.

O ensaio consistiu na colocação do aparelho dentro de uma câmara, preenchida com cada um dos meios citados anteriormente, que seria submetida a algu-

mas cargas conhecidas de coluna d'água. Preencheu-se, primeiramente, a câmara com água, depois com o material silto-argiloso, em seguida com o silto-arenoso e, novamente, com água, aplicando-se, em cada situação, variações de carga hidráulica. Os valores de poropressão registrados pelo sensor são mostrados na Figura 2.

Os resultados mostram registros de pressão absolutamente semelhantes para os três meios, indicando a qualidade da medida e provável saturação da pedra

porosa. O tempo de resposta também foi bastante satisfatório, praticamente instantâneo, não se notando diferenças nos testes realizados nos três meios. Ressalta-se, também, que, nos intervalos de troca de material, na câmara d'água, o conjunto levellogger/pedra porosa era mantido em meio aquoso a fim de não se perder a saturação. Contudo observou-se que a pedra porosa não perdia saturação facilmente, uma vez que, deixada exposta a condições atmosféricas, por 5 minutos, não se obtiveram os resultados afetados.

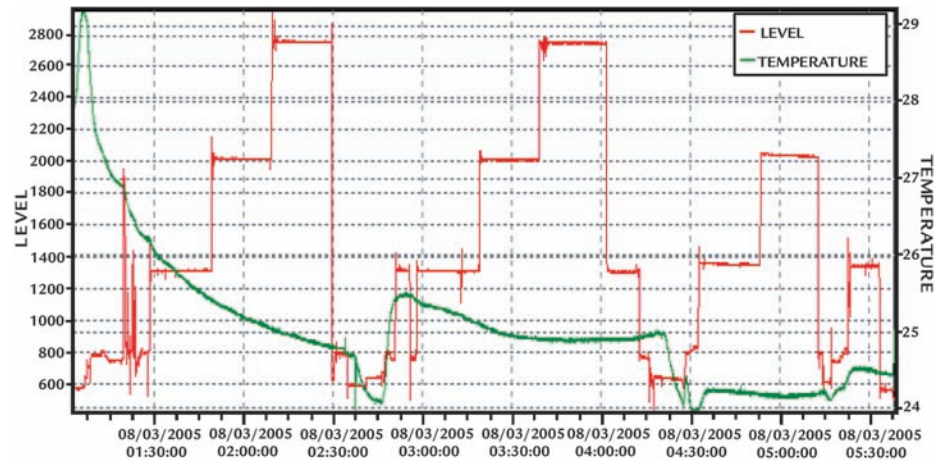


Figura 2

Resposta do levellogger no ensaio de laboratório em três meios distintos: água, rejeito silto-argiloso, rejeito silto-arenoso e água, respectivamente.

No campo

Realizaram-se, também, alguns experimentos de campo com o levellogger em uma barragem de rejeitos de minério de ferro, simulando situações que aconteceriam quando da construção de um aterro dentro do reservatório, a fim de se verificar o desempenho do aparelho, em uma condição de trabalho.

O teste mais completo constou da instalação, na barragem, de cinco levelloggers, distribuídos em duas verticais distanciadas de 3 m, aproximadamente. Três deles foram posicionados em uma vertical (LevA, LevB, LevC), nas profundidades de 50 cm, 100 cm e 150 cm, e os outros dois, na outra, nas profundidades 50 cm e 100 cm, respectivamente. Todos os instrumentos foram posicionados abaixo do NA, que era bem superficial.

O experimento compreendeu a colocação de um carregamento de material de aterro (rejeito arenoso seco), com auxílio de uma retroescavadeira, sobre a vertical do terreno, onde os LevA, LevB e LevC estavam posicionados, sendo que a vertical dos LevD e LevE foi mantida

fora do offset da área carregada com distância de 1m. O lançamento foi de uma altura aproximada de 3 m até formar uma pilha com altura no centro de cerca de 1,80 m. O teste foi programado para verificar a variação das poropressões no terreno sob a área carregada e seu impacto no entorno.

A Figura 3 mostra os resultados do teste de campo a partir do registro dos três levelloggers que estão na mesma vertical (LevA – 0.50m; LevB – 1.00m; LevC – 1.50m), bem como o registro dos dois levelloggers afastados do offset do carregamento(Lev D e LevE), os quais estão na mesma elevação que o Lev A e o Lev B, respectivamente.

Pela Figura 3, percebe-se que o carregamento é sentido com intensidade diferente nas três profundidades monitoradas e nas duas verticais. Por exemplo, o LevA registra um aumento de 105 cm de coluna d'água; o LevB, 77 cm; e o LevC, apenas 24 cm. Existe, pois, uma atenuação com a profundidade para o carregamento na superfície, lembrando que o

mesmo tem uma área restrita de atuação (aprox. 3 m², altura média de 1,3 m). É interessante notar, também, que os levelloggers de offset também registram variação de poropressão, sendo 20 cm para o LevD e 10 cm para o LevE.

Constata-se, ainda, que a dissipação das poropressões com a remoção da carga acontece de forma diferenciada. No LevA, a dissipação é bastante rápida, um pouco menos no LevB e muito lenta no LevC, sem chegar a estabilizar. Já a dissipação nos LevD e LevE, com a remoção da carga é menos pronunciada que nos correspondentes sensores LevA e LevB, não recuperando os valores de antes do carregamento dentro do tempo do teste, principalmente o Lev E.

O teste teve, pois, sucesso em quantificar a resposta de um carregamento em termos de poropressão gerada no solo em profundidade, sob a área carregada, além de analisar o tempo de dissipação do excesso de poropressão, possibilitando, assim, uma prévia dos efeitos esperados, quando da construção de um aterro.

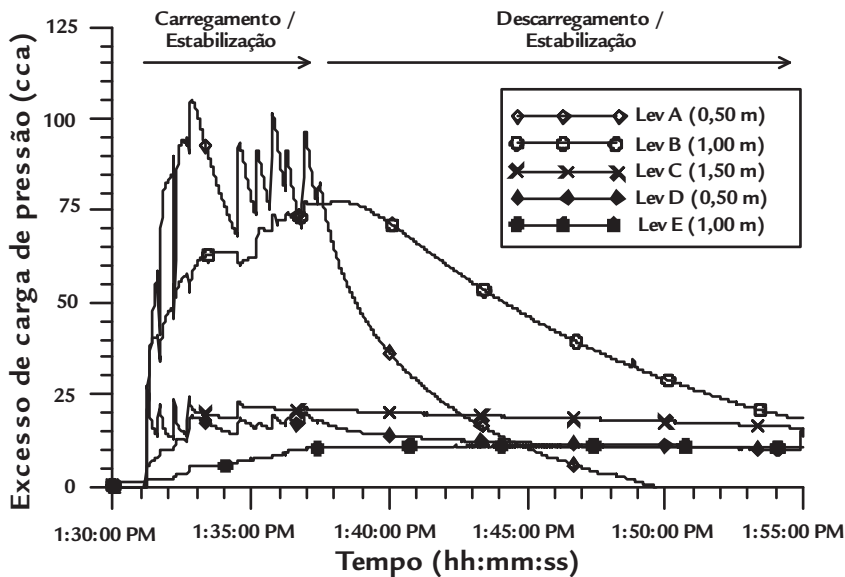


Figura 3 Registro dos levelloggers no teste de campo (Lev A, Lev B, Lev C, Lev D e Lev E).

4. Aplicação do levellogger em uma obra geotécnica – aterro teste

A eficiência das sondas levelloggers, para medida de poropressão construtiva, foi testada por ocasião da construção de um aterro experimental dentro de uma

barragem de rejeitos de minério de ferro. Tal aterro tem a forma de um pontão, assemelhando-se a um trecho de uma estrada de mina, com plataforma de 8 m, taludes

1:2 (V:H), altura final de 5 m e comprimento de 56 m. Exatamente no meio do trecho foi estabelecida a seção transversal instrumentada com levelloggers.

Instrumentação do aterro experimental

O monitoramento das poropressões do aterro experimental utilizou 6 levelloggers modelo Junior, já descritos. A configuração da instrumentação, na seção instrumentada, compreendeu uma vertical com três levelloggers a diferentes profundidades (Lev 1, Lev 3 e Lev 2), um levellogger numa vertical no meio do talude final do aterro (Lev 4) e dois levelloggers numa mesma vertical a 1m do offset do aterro e profundidades distintas (Lev 5 e Lev6), como observado na Figura 4, que também mostra o perfil estratigráfico do local.

A disposição dos levelloggers em camadas de materiais granulares visou a verificar a possibilidade de desenvolvimento de uma condição não drenada nesses estratos diante das diferentes so-

licitações impostas pela obra (vibração, carregamento, períodos de repouso, etc.), o que, geralmente, não é motivo de preocupação em obras geotécnicas convencionais, apesar da sua importância, como comprovado por Penna (2008).

Para instalação dos levelloggers, o acesso ao local se deu com auxílio de estrados de madeira (“pallets”), o que garantiu suporte suficiente para a movimentação da equipe. Para o posicionamento das sondas, nas profundidades de projeto, realizou-se um pré-furo com um trado manual até cerca de 15 cm antes da elevação devida. Os levelloggers foram instalados solidários a uma haste de ferro galvanizado para facilitar a cravação dos sensores, bem como ajudar no resgate dos mesmos ao final dos trabalhos. Para

isso, cada haste tinha um comprimento superior à profundidade de cravação de cada levellogger, em relação à superfície do depósito.

Alguns levelloggers foram utilizados no modo de monitoramento em tempo real, ficando conectados a cabos de comunicação direta, que passavam por dentro das hastes de ferro galvanizado de instalação e de outras extensões de PVC conectadas ao levellogger e saíam verticalmente para fora do corpo do aterro, onde eram conectados a um notebook utilizado como fonte de leitura dos dados. O tubo que continha os cabos era emendado por luvas de conexão à medida que o aterro ganhava altura, sendo que sua extremidade foi protegida das intempéries por um saco plástico.

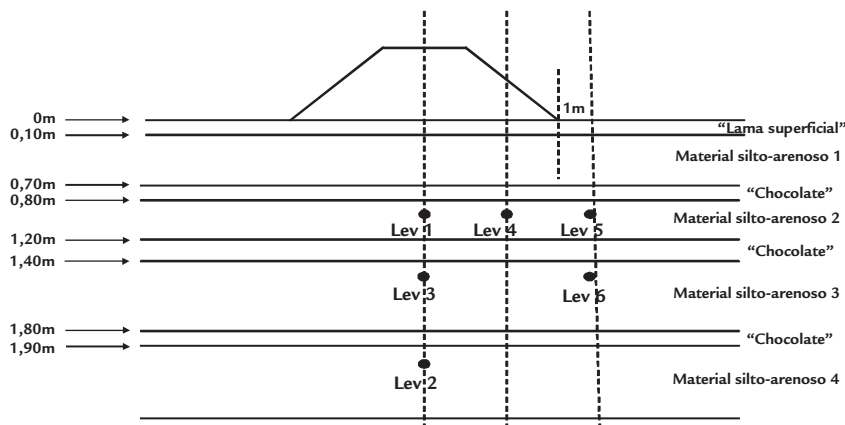


Figura 4 Detalhes da seção instrumentada e do perfil estratigráfico da fundação. Nota: “Chocolate” = material silto-argiloso.

Construção / monitoramento do aterro experimental

A construção do trecho experimental compreendeu técnicas e procedimentos que se adequassem à realidade construtiva da empresa de mineração, no que se refere à construção de diques internos e a acessos sobre depósitos de rejeitos. O método construtivo apresenta duas etapas distintas: a formação de uma base conhecida como forro, realizada por aterro de ponta, e construção do restante do aterro em camadas. Em ambas, o transporte de material até o local do aterro é feito por caminhões, que basculam, formando pilhas, que depois são movimentadas por um trator de esteiras, sendo a compactação obtida apenas por tráfego dos equipamentos de transporte e de terraplenagem.

A obra do aterro teve acompanhamento visual integral, de modo a permitir correlações dos dados registrados pela instrumentação com as anotações do di-

ário de campo, fotografias e filmagens. A referida obra também foi objeto de fiscalização e gerenciamento, no tocante aos procedimentos construtivos.

As poropressões geradas durante todas as fases de construção do aterro foram monitoradas de forma remota (Lev3, Lev4 e Lev6) e em tempo real (Lev1, Lev2 e Lev5), tendo o monitoramento em tempo real permitido a análise do comportamento do aterro, durante a obra, através de cabos conectados a um notebook. Já para avaliação do comportamento do aterro, na fase pós-construtiva, foram mantidos os três leveloggers de comunicação direta, pois podiam ser reprogramados sempre que necessário. Os dados registrados pelos leveloggers, na mesma vertical do centro do aterro (Lev1, Lev3 e Lev2), são mostrados na Figura 5, em forma de gráficos, que relacionam a carga de pressão no tempo.

Percebe-se, para todos os leveloggers, que o registro de poropressões apresenta valores elevadíssimos, na fase de construção do forro (2), e números bem menores, na fase de construção em camadas (4, 5 e 6). Há, também, uma excelente consistência entre si dos leveloggers no registro dos diversos eventos pelos quais passou a construção do aterro. Um exemplo da sensibilidade desse aparelho pôde ser atestado quando o Lev3 registrou, com precisão, um evento de artesianismo, que se deu pela sua haste, aproveitando-se do furo de instalação do mesmo, como mostra o gráfico da Figura 6. Por fim, o monitoramento permitiu registrar os períodos de dissipação das poropressões durante o período noturno e, também, a elevação do nível d'água inicial, no local, por causa da obra.

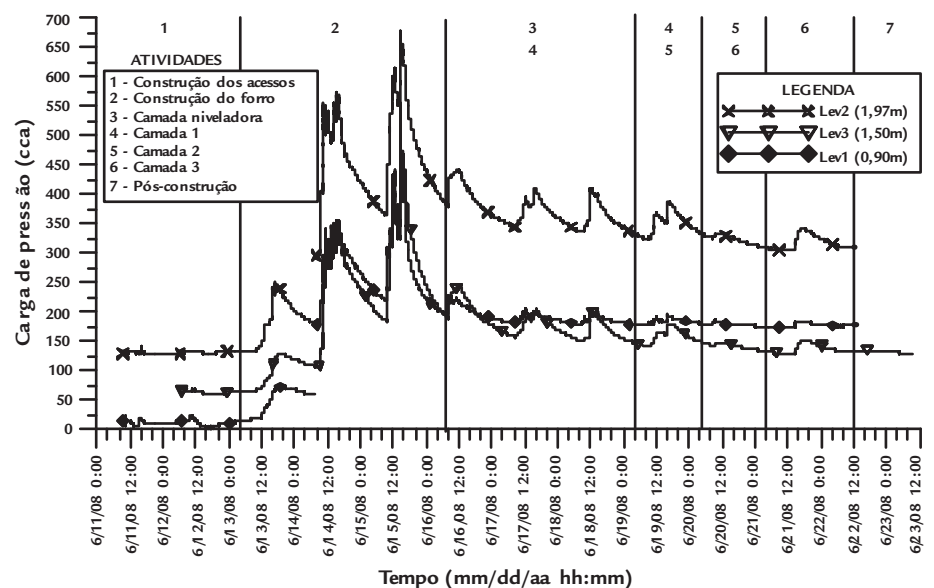


Figura 5

Registro dos leveloggers no centro da seção instrumentada (Lev1, Lev2 e Lev3).

5. Conclusões

O uso do levelogger, numa condição fora de sua aplicação usual, foi uma novidade trazida nesse trabalho, principalmente com o sucesso da introdução da pedra porosa como elemento filtrante do seu sistema de medida.

O levelogger, como instrumento de medição de poropressão de eventos que demandam tempo de resposta rápido, combinado com a característica de poder operar remotamente e com armazenamento dos dados em datalogger interno, é uma excelente proposta de instrumentação, fornecendo dados consistentes e precisos, além de ser de fácil

operação e instalação.

A verificação da consistência dos resultados e da análise do desempenho dos instrumentos foi realizada em testes de laboratório e de campo e durante a obra, trazendo confiança quanto à validação dos registros obtidos, além de que houve compatibilidade entre os dados registrados pela instrumentação com as observações de campo, com auxílio de ferramentas de registro.

Comprovou-se, também, que o conjunto levelogger/pedra porosa responde bem quando operando em água,

em solos silto-arenosos ou em solos silto-argilosos, não havendo diferenças significativas de tempo de reposta e/ou sensibilidade entre os casos.

A utilização do levelogger/pedra porosa tem uma relação custo x benefício vantajosa, quando comparada a outras ferramentas disponíveis no mercado, para o monitoramento de poropressões construtivas, e a pesquisa foi conclusiva quanto à possibilidade de utilização do levelogger adaptado com o elemento filtrante (pedra porosa), para monitoramento de poropressão em depósitos de solos.

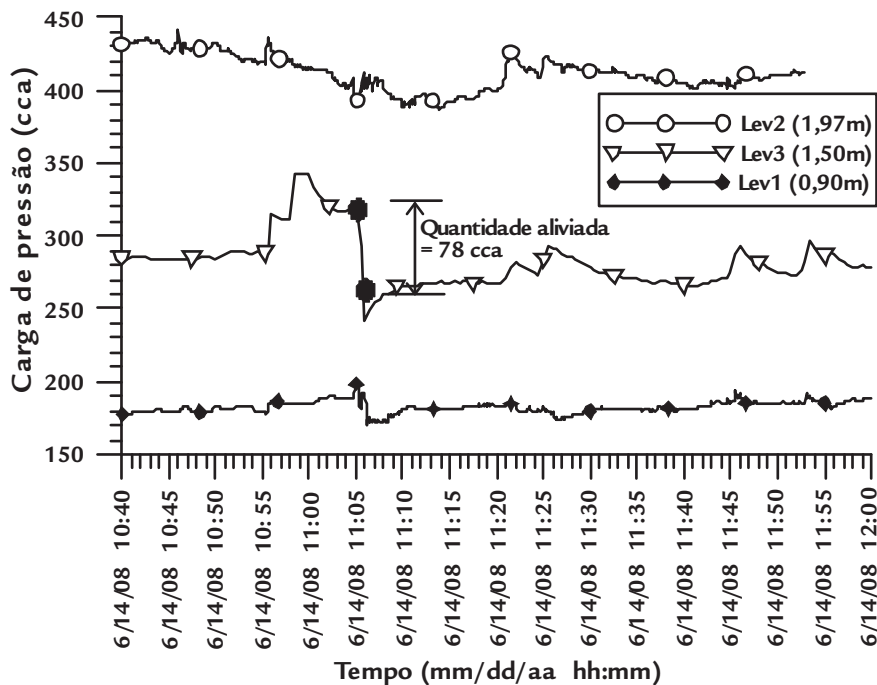


Figura 6
Registro do evento de artesianismo no Lev3.

6. Referências bibliográficas

- OLIVEIRA-FILHO, W.L. et al. A new technique for field monitoring of fine mine tailings. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 10. Ouro Preto, 2002. 6p.
- PENNA, D. C. *Análise acoplada entre consistência e resistência não drenada de um rejeito fino de minério de ferro*. Ouro Preto: Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 2007. (Dissertação de Mestrado).
- PENNA, L.R. *Estudo da construção de aterros sobre depósitos estratificados de rejeitos de mineração*. Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2008. (Dissertação de Mestrado).

Artigo recebido em 28 de dezembro de 2009. Aprovado em 17 de agosto de 2012.