

Instrumentos de pluviometria para monitoramento de obras geotécnicas: desenvolvimento e calibração

Arthur Rafael Medeiros de Araújo
Engenheiro Civil, Imetame Logística Porto, Aracruz, Brasil, arthurrafael@hotmail.com

Marina de Paula Moura
Engenheira Hidrotécnica/Doutoranda em Hidrotecnia, TPF Engenharia/UFPE, Maceió, Brasil, marina.moura@tpfe.com.br

Luana Raquel Juvino da Silva
Engenheira Geotécnica, TPF Engenharia, Pindoretama, Brasil, luana.raquel.365@ufrn.edu.br

Riadny Patrícia de Souza Ferreira
Engenheira Geotécnica/Doutoranda em Geotecnia, TPF Engenharia/UFPE, Recife, Brasil, riadny.ferreira@ufpe.br

Fagner Alexandre Nunes de França
Docente, UFRN, Natal, Brasil, fagner.franca@ufrn.br

RESUMO: O acompanhamento de obras geotécnicas envolve a instalação de instrumentos e monitoramentos periódicos da estrutura. Para isso, a escolha e posicionamento dos equipamentos precisam ser estratégicos a fim de abranger uma área significativa da região. A verificação do funcionamento adequado dos instrumentos de monitoramento geotécnico apresenta uma importância relevante para o acompanhamento do desempenho eficiente destas obras. Além disso, a correlação dessas informações com o pluviógrafo pode tornar a análise mais assertiva e coerente. Neste contexto, este artigo tem o objetivo de ressaltar a importância dos testes de vida e calibração dos pluviógrafos desde o início da sua fabricação e instalação. Para isso, foi desenvolvido um pluviógrafo flutuador, com componentes eletrônicos e materiais de baixo custo como isopor e tubos de pvc. Para a calibração do equipamento de pluviometria foram verificadas três dimensões, sendo elas: tempo, volume e intensidade. Considerando o tempo, foi observado a velocidade da rotação do motor, quanto ao volume foi verificado através do registro da altura de lâmina de água no interior do tubo de armazenamento do equipamento. Por fim, considerando a dimensão da intensidade, foi observada a relação do volume em função do tempo. Os testes realizados abordaram a análise da rotação do motor interno e a calibração do volume da altura da lâmina. Os resultados indicaram uma boa correlação dos valores com coeficiente de determinação (R^2) próximo de 1 e boa aplicação para casos de usos de instrumentação de baixo custo.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento geotécnico, Instrumentação, Calibração, Pluviógrafo.

ABSTRACT: Monitoring geotechnical works involves the installation of instruments and periodic monitoring of the structure. To achieve this, the choice and positioning of equipment needs to be strategic in order to cover a significant area of the region. Verifying the proper functioning of geotechnical monitoring instruments is of relevant importance for monitoring the efficient performance of these works. Furthermore, the correlation of this information with the pluviograph can make the analysis more assertive and coherent. In this context, this article aims to highlight the importance of life testing and calibration of rain gauges from the beginning of their manufacture and installation. To achieve this, a floating pluviograph was developed, with electronic components and low-cost materials such as Styrofoam and PVC pipes. To calibrate the rainfall equipment, three dimensions were checked, namely: time, volume and intensity. Considering time, the speed of rotation of the engine was observed, and the volume was verified by recording the height of the water depth inside the equipment's storage tube. Finally, considering the dimension of intensity, the relationship between volume and time was observed. The tests carried out covered the analysis of the rotation of the internal engine and the

calibration of the blade height volume. The results indicated a good correlation of values with a coefficient of determination (R^2) close to 1 and good application for low-cost instrumentation use cases.

KEYWORDS: Geotechnical monitoring, Instrumentation, Calibration, Rain gauge.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas geotécnicas precisam de uma série de dispositivos para que a análise dos seus comportamentos seja bem multidisciplinar. Isto pode ser exemplificado desde a observação histórico de leituras de instrumentos locados em pontos mais críticos até a inspeção visual de campo para identificar situações rotineiras. Para complementar tais análises, existem alguns equipamentos que costumeiramente são estudados pela equipe hidrotécnica, mas precisam ser mais valorizados e inseridos no contexto holístico da análise. Exemplo disto é o pluviômetro, que registra o volume de água precipitada na região e pode se relacionar quanto ao comportamento e tempo de resposta de outros instrumentos locados em uma barragem, como piezômetro, indicador de nível de água (INA), por exemplo.

De acordo com a Resolução nº 95 (ANM, 2022), o sistema de monitoramento de segurança de barragens precisa conter instrumentos suficientes para que haja o acompanhamento correto, temporal e eficaz da estrutura. Neste sentido, desde a escolha de quais equipamentos serão usados até a determinação de localização de cada um deles, tudo precisa ser estratégico. Ao locar os instrumentos em regiões específicas, pode-se ter uma melhor representação do comportamento e fluxo de água na estrutura. Isto possibilita a verificação prévia de anomalias e resposta dos instrumentos às condições climáticas, por exemplo.

No tocante à entrada de água na estrutura, isto ocorre através da precipitação e ela precisa ser mensurada ao longo do tempo. A importância disto está na aplicação da análise conjunta da barragem aliada com as leituras dos instrumentos locados a montante e jusante. Além disso, é possível também acompanhar o desempenho da estrutura diante a solicitação externa, visto que elevados volumes de chuva podem potencializar a instabilidade geotécnica da estrutura.

A depender da região onde a estrutura é localizada, constantes eventos extremos de pluviometria podem ser registrados e, conseqüentemente, impactar significativamente, na estabilidade geotécnica da região, como os frequentes deslizamentos que ocorrem nas regiões serranas no sudeste brasileiro (D'orsi, R., 2011) Dessa forma, a mensuração da precipitação se torna cada vez mais essencial para além de monitoramento e, quando possível, previsibilidade das condições extremas que podem gerar impactos sociais, ambientais e financeiros.

Em obras geotécnicas, os instrumentos de medição da pluviometria são utilizados principalmente para monitoramento do volume de água que aporta nas estruturas, dessa forma é possível compreender o comportamento dos piezômetros e entender o desempenho da rede de fluxo, por exemplo, em barragem com maciço de terra. Além disso, a estabilidade de taludes e encostas pode estar associada a infiltração da precipitação, existem diversos exemplos da ocorrência de movimentos de massa correlacionado ao volume da pluviometria.

Nesse sentido, além da disponibilidade de um dispositivo de mensuração de precipitação como os pluviômetros, ou também podem ser denominados pluviógrafos quando registram dados medidos em intervalos de tempo inferiores a um dia. Estes instrumentos devem, ser periodicamente calibrado, para manter a confiabilidade e precisão dos seus resultados, visto que estes ficam expostos e podem receber sujeiras e insetos dentro do seu recipiente de armazenamento interno, alterando o volume registrado.

Neste contexto, este trabalho tem o objetivo de ressaltar a importância dos testes de vida e calibração dos pluviógrafos desde o início da sua fabricação e instalação. Para isso, será desenvolvido um pluviógrafo flutuador, com componentes eletrônicos e materiais de baixo custo como isopor e tubos de Policloreto de Vinila (PVC), considerando para a calibração do equipamento três dimensões, sendo elas: tempo, volume e intensidade.

2 METODOLOGIA

2.1 Desenvolvimento do pluviógrafo

O pluviógrafo deste trabalho foi desenvolvido com alguns componentes eletrônicos e materiais de baixo custo como isopor e tubos de PVC (Figura 1). A caixa protetora externa do pluviógrafo foi feita com poliestireno, que possui boa rigidez e é um material leve, além disso foram utilizados componentes eletrônicos com as funções de regular a tensão e determinar a frequência da corrente no sistema e fazer o motor rotacionar a uma velocidade angular constante foram utilizados.



Figura 1. Pluviógrafo desenvolvido.

Para o sistema de rotação foram usados o motor de passo de 12 V e a caixa de redução automotiva de 12 V, sendo que todos estes componentes são alimentados por uma fonte de 12 V que é alimentada por qualquer saída de energia (tomada). Também foram utilizadas tubulações de pvc para os sistemas de captação, transporte, armazenamento e do extravasor do pluviógrafo, sendo que o tubo de captação e de armazenamento são de 100 mm e os de transporte e do extravasor de 20 mm, tendo um funil de 100 mm de diâmetro externo acoplado a superfície captadora. E o sistema de elevação é basicamente composto por isopor, que é utilizado como boia, e hastes metálicas.

Considerando o funcionamento do pluviógrafo, pode ser verificado que na parte superior do dispositivo existe um tubo para captação da precipitação e uma vez que a água entra nesse tubo ela é transportada para uma tubulação menor, com o funil fazendo essa conexão de tubulações de diâmetros diferentes. Essa tubulação de transporte leva a água para um cilindro onde será armazenada. No interior desse cilindro tem uma boia que sobe a medida que o nível de água sobe no interior do cilindro, e essa boia está conectada ao elemento registrador, ou seja, a medida que a boia se eleva o elemento registrador também é elevado na mesma proporção. A informação é registrada em um papel acoplado a um cilindro que está rotacionando a uma velocidade constante, pois o cilindro está conectado ao sistema do motor do pluviógrafo.

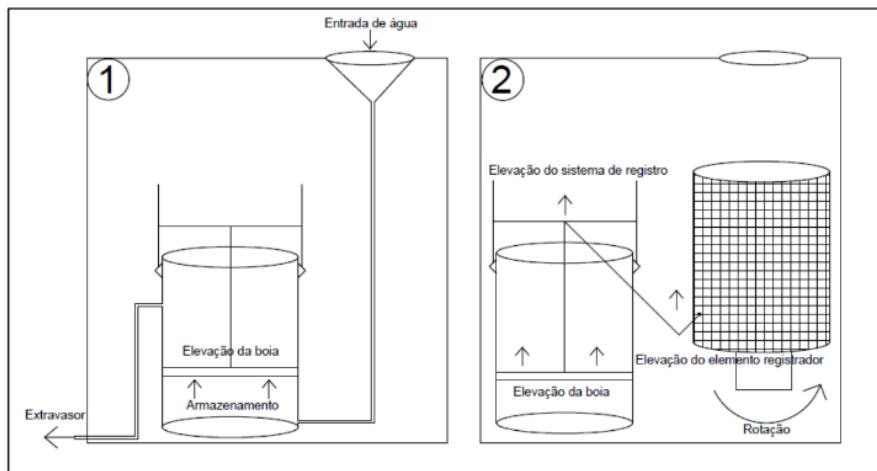


Figura 2. Esquema de funcionamento do pluviógrafo.

2.1 Calibração

O processo de calibração aplicado neste trabalho considerou três variáveis: tempo, volume e a intensidade (volume em relação ao tempo). Para analisar o fator tempo foi utilizado a frequência de rotação do motor se mantinha constante ao longo do tempo de forma a manter a velocidade linear, foram realizados cinco ensaios para os tempos de 10, 30, 60 e 120 minutos sendo que para cada foi verificado o comprimento registrado no eixo da abscissa do papel envolto no cilindro, a partir destes valores foi calculada a velocidade linear em centímetros por minuto.

Ainda é importante destacar que instrumento elaborado possui um dispositivo para alterar a velocidade de rotação do motor, no entanto, para os ensaios foram utilizados a velocidade mínima, visto que esta já foi suficiente para calibração do pluviógrafo e não houve necessidade de elevar o valor adotado.

O fator volume também foi considerado para a calibração, nesse sentido para o cálculo do volume registrado pelo instrumento é necessário identificar a altura da lâmina de água dentro do seu recipiente de armazenamento interno. Dessa forma, variando o volume de entrada no pluviógrafo deve haver a variação da altura da lâmina de água registrada, sendo assim o processo de calibração também considerou cinco ensaios para nove valores de volume de 100 a 900 ml, variando de 100 ml.

Para aferição do volume de entrada no dispositivo, com o objetivo de melhorar a precisão foi realizado a pesagem do mesmo em uma balança e posteriormente, inserido no pluviógrafo, sendo assim esse valor foi comparado com o registrado pelo instrumento. Para a conversão da altura da lâmina de água em volume foi realizado a multiplicação da altura de elevação da boia no interior do cilindro (recipiente de armazenamento interno), em centímetros e a área do cilindro de armazenamento no interior do pluviógrafo, em metros quadrados, com as devidas conversão de unidades.

O último fator avaliado para a calibração do pluviógrafo foi a intensidade, ou seja, a relação volume no tempo, para isso foi utilizado um regulador de vazão adaptado através de um equipo de soro hospitalar, foi imposto um fluxo de aproximadamente 6 mL/min, o que equivale a uma precipitação em torno de 50 mm/h, tendo um volume esperado de 357 mL em uma hora. Além disso, destaca-se que foi inserido um volume de 100 mL no pluviógrafo antes de iniciar os ensaios de calibração para a intensidade para evitar possíveis perdas dos volumes registrados.

Para a calibração da intensidade foi realizados cinco ensaios, considerando um tempo de 60 minutos e a aferição do volume também foi realizado através da pesagem. Dessa forma, após a inserção da vazão no instrumento considerando o tempo adotado foi realizada a pesagem do volume final, comparado com o volume verificado com o esperado através das alturas da lâmina água.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através dos ensaios de calibração foram obtidos os dados apresentados na Figura 3, sendo que o gráfico (a) representa os dados de calibração do tempo, que está relacionado com a rotação do motor e o gráfico (b) está relacionado com a calibração do volume, verificando a altura de lâmina de água registrada. Os resultados

obtidos foram satisfatórios uma vez que era esperada uma linearidade nos resultados, que foi comprovada pelo bom ajuste.

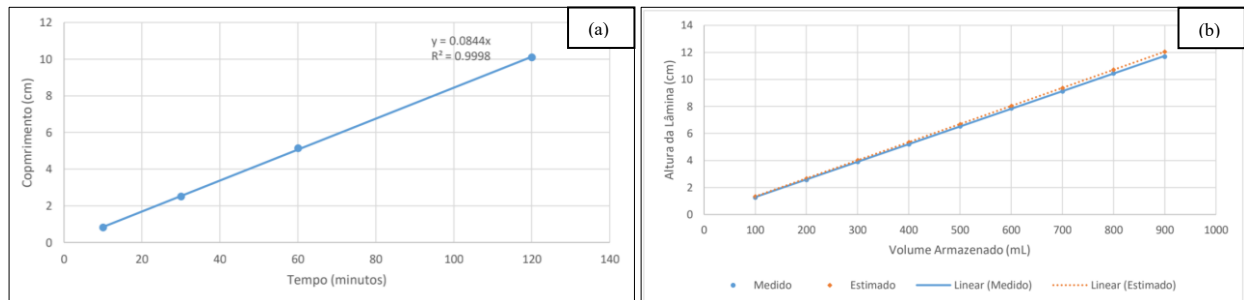


Figura 3. (a) Calibração do tempo – tempo x comprimento; (b) Calibração do volume – volume x altura;

Na calibração do tempo o maior erro absoluto em relação a média foi de 0,21 cm, o que equivale a 2,5 minutos. A velocidade mínima no início dos experimentos foi em torno de 0,855 cm/min, reduzindo para 0,1333 cm/min, sem razão aparente, mantendo-se constante por um longo período de tempo. No entanto, após 30 horas de experimentos foi verificado que a velocidade mínima novamente mudou de 0,1333 cm/min para em torno de 0,855 cm/min, que era a condição inicial.

Essa variação da velocidade mínima pode comprometer a precisão do registro do tempo, sendo que essa variação deve ter sido causada por falhas nos componentes eletrônicos que regulam a rotação do motor. Porém é válido destacar que a velocidade não se alterou durante os ensaios de calibragem, mantendo-se constante, além disso essas variações de velocidade não foram frequentes em mais de 70 horas de experimento. Em cada intervalo de tempo foram feitos cinco testes e os desvios-padrão, coeficiente de variação e erro absoluto máximo de cada grupo estão na tabela 1.

Tabela 1. Dados da calibração do tempo

Tempo (min)	Média (cm)	Desvio-padrão (cm)	Coef. Variação	Erro abs. Máx (cm)
10	0,82	0,03	0,03	0,03
30	2,50	0,00	0,00	0,00
60	5,14	0,15	0,03	0,21
120	10,01	0,14	0,01	0,20

Quanto ao volume os valores encontrados foram satisfatórios, uma vez que o maior erro absoluto calculado entre os valores medidos e estimados foi de 0,35 cm, o que equivale a uma precipitação de 3,5 mm, e o maior erro relativo de 4,4%. Os valores medidos foram obtidos com a leitura do registro do pluviógrafo devido ao volume inserido e os estimados foram calculados de acordo com as dimensões da área de armazenamento. Durante essa calibração foi observado que se perde 1 centímetro de lâmina de água registrada quando o recipiente se encontra vazio, sendo essa perda por causa do espaço entre a boia e o fundo do recipiente. Portanto, como forma de contornar essa condição, e para não haver perda de informação foi necessário inserir um volume mínimo de 75 mL antes colocar o pluviógrafo em operação, pois este corresponde a um centímetro de lâmina de água registrada, aproximadamente, 10 mm de chuva.

Na calibração da intensidade de precipitação os dados registrados nesses experimentos foram colocados em formato de gráfico (Figura 4), demonstrando que os valores registrados foram próximos de uma reta e perto dos valores da reta estimada. Foram calculados e comparados os valores estimados com os registrados pelo pluviógrafo e duas alturas diferentes foram estimadas, uma de acordo com o volume que era para ser inserido no tempo com o fluxo constante e a outra de acordo com o volume que era realmente inserido e pesado ao final do experimento.

Para o tempo, o valor estimado foi calculado de acordo com a velocidade mínima calculada nos ensaios de calibração do tempo. O erro absoluto máximo observado entre o estimado e o medido para o tempo foi de 0,17 cm, que equivale a 2 minutos. Para a altura estimada 1 (previsão do volume inserido pelo fluxo constante)

foi de 0,29 cm, o que equivale a uma precipitação de 3 mm, e para a altura estimada 2 (volume pesado ao final do experimento) de 0,16 cm, equivalente a 1,6 mm de chuva.

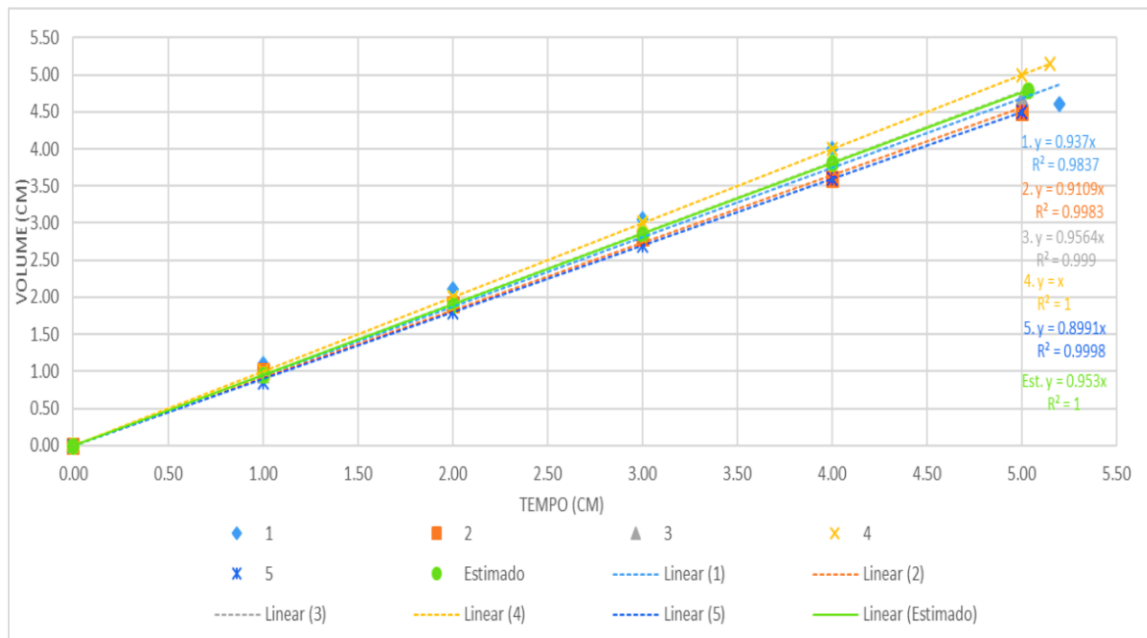


Figura 4. Retas de intensidade dos dados obtidos na calibração – tempo x volume

4 CONCLUSÃO

O pluviógrafo desenvolvido faz o registro dos dados da intensidade de uma forma adequada, pois o maior erro registrado nos testes foi de uma precipitação de 3 mm. Ainda quanto a calibração do tempo, apesar de terem ocorrido variações na velocidade mínima do motor, isso não impactou negativamente nos dados, visto que essas variações ocorreram duas vezes em mais de 70 horas de experimentos.

Na calibração do volume, foram abordados valores de altura de lâmina de água e os erros verificados não foram elevados, sendo o maior deles inferior a 5%. Além disso, os resultados encontrados apontaram uma boa correlação dos valores com coeficiente de determinação (R^2) próximo de 1 e indicaram uma boa aplicação em casos que haja necessidade de instrumentação de baixo custo.

Como sugestão para trabalhos futuros indica-se implantar o microcontrolador Arduino com sensor ótico nesse pluviógrafo e implantar um sistema de bateria ou placa fotovoltaica para alimentar o sistema elétrico do pluviógrafo, para que esse aparelho possa ser instalado em qualquer local.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pelo acolhimento e interesse nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Mineração - ANM. (2022) *Resolução n° 95*, de 7 de fevereiro de 2022.
- Borges, E. M., Pina, N. V. M., Nascimento, C. F., Latuf, M. O. (2012) *Confecção e Calibração de Pluviômetro Alternativo como Subsídio à Medição de Precipitação*. Universidade Federal da Bahia, 11p.
- Chappell, R.R., Colt, R.B. (1935) *Float type raingauge*, US2118459 A, 21 maio 1935.
- Collischon, W., Dornelles, F. (2015) *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*. 2 ed. Porto Alegre: ABRH.

- D'orsi, R. (2011) *Correlação entre pluviometria e escorregamentos no trecho da Serra dos órgãos da rodovia federal BR-116 RJ* (Rio – Teresópolis). Tese de doutorado em Ciências e Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE, Rio de Janeiro.
- Dulnik, P. R. (2006) *Elaboração de um Pluviógrafo com Sensor Ótico*. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 85p.
- Garcez, L. N., Alvarez, G. A. (1988) *Hidrologia*. 2 ed. São Paulo: E. Blucher.
- Godinho, F. L., Pereira, S. (2014) Pluviógrafo com Leitura em Tempo Real baseado no Microcontrolador Arduino. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, *Anais...* v.42, Campo Grande.
- Manríquez, I. A. G., Espinosa, O. L., De La Vega, J. A. (2016) Diseño y desarrollo de un pluviógrafo semiautomático tipo Hellman. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Texcoco, v. 7, n. 1, p. 95-101, janeiro./fevereiro.
- Mendéz, A. J. L., González, A. H., Monagas, M. G., Gilbert, A. I. A. (2013) Captación de lluvia con pluviógrafos de cubeta y su postprocesamiento. *Ingeniería Hidráulica e Ambiental*, Havana, v. 34, n. 2, p.73-87, maio/agosto.
- Pinto, N. L. S., Holtz, A. C. T., Martins, J. A., Gomide, F. L. S. (1976) *Hidrologia básica*. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher.
- Tucci, C. E. M. (2009) *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4 ed. Porto Alegre: UFRGS.
- World Meteorological Organization – WMO. (2014) *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Geneva.