

Calibração de Sensores Medidores de Umidade para Solo - Comparação entre Calibração de Laboratório e Campo

Gustavo Silva

Geoestável Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, gustavo.silva@geoestavel.com.br

Roberto Azevedo

Professor Titular da Universidade Federal de Viçosa, Brasil, roberto.azevedo@ufv.com.br

Ney Rosário Amorim

Geoestável Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, ney.amorim@geoestavel.com.br

Leonardo Ventura

Geoestável Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, leonardo.ventura@geoestavel.com.br

Lineker Trindade

Loctest, Belo Horizonte, Brasil, lineker.trindade@loctest.com.br

RESUMO: Neste artigo são apresentadas duas metodologias desenvolvidas para calibração em laboratório e em campo de sensores do tipo Water Content Reflectometer (WCR). Estes sensores são usualmente aplicados a experimentos de sistemas de cobertura com solo, para medir a variação ao longo do tempo do perfil de umidade dos solos usados no sistema de cobertura, para avaliar a sua eficácia. Estes equipamentos tem sido usualmente utilizados para obter a umidade de solos não saturados de maneira instantânea e automática através de sistema de aquisição de dados. Para isso, antes de serem instalados no campo, estes instrumentos devem ser calibrados. Neste artigo, os resultados obtidos em ambas as calibrações são comparados e é possível observar variação significativa entre elas.

PALAVRAS-CHAVE: Water Content reflectometer, Solos não Saturados, Sistema de Cobertura, Calibração de Laboratório, Calibração de Campo.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil as questões relacionadas ao fechamento de mina são ainda recentes, tendo maior repercussão nos últimos quinze anos com a criação das Normas Reguladoras da Mineração do DNPM (2001) e, no caso de Minas Gerais, com a deliberação normativa COPAM 127 (2008). No nosso país, tem-se verificado uma preferência para dispor rejeitos de mineração em superfície, armazenados em reservatórios, que, durante o fechamento do empreendimento, devem ser cobertos por

sistemas de cobertura a fim de garantir a estabilização física e química dos mesmos. Neste contexto, os projetos de fechamento de reservatórios de barragem de rejeito que geram drenagem ácida de mina demandam o dimensionamento de sistemas de cobertura geralmente feitos com solo. Dada a importância do problema ambiental, nestes casos frequentemente se constrói experimentos monitorados no campo, a fim de validar modelos matemáticos e auxiliar na comparação de diferentes soluções para se usar no projeto

executivo do sistema de cobertura de um determinado reservatório.

Parte essencial do monitoramento destes experimentos é a obtenção da variação ao longo do tempo do perfil de umidade dos solos usados no sistema de cobertura, para avaliar a sua eficácia. Sensores de umidade do tipo Water Content Reflectometer (WCR) ou Time Domain Reflectometer (TDR) tem sido usualmente utilizados para obter a umidade de solos não saturados de maneira instantânea e automática através de sistema de aquisição de dados. Para isso, antes de serem instalados no campo, estes instrumentos devem ser calibrados.

Os WCR são instrumentos que medem a umidade volumétrica de maneira indireta, através da frequência de pulsos eletromagnéticos. A umidade medida pelo sensor é dependente da permissividade dielétrica do meio em que o mesmo está inserido. No caso de solos, a permissividade depende não somente da umidade, mas também da densidade e constituição mineralógica do mesmo. Por este motivo, faz-se necessária a calibração dos sensores com o solo nas mesmas condições de campo onde eles serão inseridos.

2 OBJETIVO

Apresentar as metodologias de calibração de laboratório e campo para sensores de umidade (WCR) e comparar os resultados obtidos.

3 METODOLOGIA CALIBRAÇÃO DE LABORATÓRIO

A metodologia para calibração de laboratório de sensores de umidade adotada é semelhante ao que foi realizado por Silva (2014) e pode ser dividida em cinco etapas:

1. Caracterização dos solos nos quais os sensores estarão instalados;
2. Definição da fôrma para moldagem dos corpos de prova;
3. Preparação das amostras;
4. Moldagem dos corpos de prova; e

5. Obtenção das leituras dos sensores de umidade.

As etapas citadas serão detalhadas a seguir.

3.1 Caracterização dos solos

O experimento construído para avaliar a eficácia da cobertura possui apenas dois tipos de solos, conforme apresentado na Tabela 1, sendo eles um solo residual siltoso e um rejeito com textura siltosa, conforme normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6457 (ABNT, 2004) e NBR 7180 (ABNT, 1984b), NBR 7181 (ABNT, 1984c) e NBR 6459 (1984a).

Tabela 01- Caracterização dos Materiais

Solo	γ_s (g/cm ³)	Granulometria (%)			
		Ped.	Areia	Silte	Arg
Rejeito	2,81	0	4	90	6
Solo Residual	2,76	0	11	81	8

No experimento construído, o solo residual foi executado de dois modos distintos: com camadas onde houve controle de compactação próximo a 100% do proctor normal; ou em camadas menos densas (mais permeáveis), sendo denominado respectivamente de barreira hidráulica (BH) e solo de armazenamento e liberação (A&L). As densidades destes materiais depois de compactados no campo foram obtidas por meio de ensaio de frasco de areia e estão apresentadas na Tabela 02.

Tabela 02 – Densidades medidas In Situ

MATERIAL	DENS. SECA (g/cm ³)
Rejeito	1,16
BH (100% proctor normal)	1,58
A&L	1,38

3.2 Definição da Fôrma

A definição da fôrma para a moldagem dos corpos de prova foi orientada tomando-se por

base as dimensões dos sensores WCR. O modelo utilizado no experimento é formado por duas hastes metálicas de 300 mm de comprimento e 3,2 mm de diâmetro presas a uma base rígida, conforme apresentado na Figura 1.

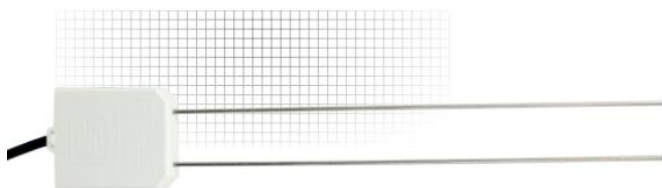


Figura 1 - Sensor de Umidade WCR. (Campbell Scientific Inc, 2014)

De acordo com o manual do fabricante do equipamento (Campbell Scientific Inc, 2016), a haste deve ficar completamente envolta pelo meio poroso do qual pretende-se medir a umidade. Por este motivo foram adotadas fôrmas metálicas cilíndricas usualmente utilizadas para moldar corpos de prova de concreto, cujas dimensões são de 150mm de diâmetro e 300mm de profundidade.

3.3 Preparação das Amostras

Os solos apresentados na Tabela 01 foram devidamente preparados (secos ao ar, peneirada e destorroada) conforme normas ABNT-NBR-6457.

Posteriormente as umidades foram obtidas (Norma ABNT-NBR-6457). Estes valores obtidos foram utilizados posteriormente para cálculo das massas de solo e água a serem acrescidas na moldagem dos corpos de prova.

3.4 Moldagem dos Corpos de Prova

Para cada material foram moldados corpos de prova com a mesma densidade seca apresentada na Tabela 02, porém variando-se a umidade entre eles desde quase seco até praticamente saturados.

A umidade higroscópica obtida após a preparação das amostras foi medida, as

amostras de solo eram pesadas e, em seguida, adicionava-se a quantidade exata de água necessária para atingir a umidade desejada em cada corpo de prova. Feito isso a amostra era peneirada para facilitar a homogeneização e ficava pronta para montagem dos corpos de prova.

Para obter as densidades secas especificadas em cada caso, os corpos de prova foram moldados em 6 camadas. A cada camada, o solo com umidade conhecida era pesado, lançado cuidadosamente dentro do molde cilíndrico e compactado com auxílio de um soquete até atingir a altura de 5cm, equivalente a 1/6 da altura total do molde. O processo se repetia até que o molde cilíndrico ficasse preenchido com a densidade seca e umidade especificadas (Figura 2).



Figura 2- Corpo de Prova Moldado

Deste modo, foram obtidos corpos de prova distintos utilizando-se o mesmo solo e mesma densidade seca, variando-se apenas a umidade entre eles.

3.5 Obtenção das Leituras dos Sensores

Após a moldagem dos corpos de prova, os sensores eram cravados até que suas hastes ficassem completamente inseridas no solo (Figura 3). Apenas um sensor era cravado por vez. Para cada corpo de prova foram cravados cinco sensores e mediu-se o período em μs adotando-se a média aritmética dos cinco, conforme apresentado na Tabela 03 para solo compactado com G.C. 100% do proctor

normal, Tabela 04 para solo de armazenamento e liberação e Tabela 05 para rejeito.

Os sensores foram ligados ao datalogger, sendo possível realizar a leitura instantaneamente.



Figura 03 – Sensores inseridos nos corpos de prova.

Tabela 03 – Dados da Calibração de Laboratório – Solo compactado com G.C. 100% Proctor Normal

SOLO	UMID. VOL.	PERÍODO LIDO (μs)	PERÍODO CONSIDERADO (μs)
SOLO COMPACTADO COM G.C 100% PROCTOR NORMAL	0.13	22.17	22.30
		22.30	
		22.46	
		22.22	
		22.35	
	0.22	25.21	25.28
		25.21	
		25.30	
		25.49	
		25.18	
	0.30	27.65	27.58
		27.57	
		27.47	
		27.45	
		27.76	
	0.38	28.81	28.70
		28.78	
		28.86	
		28.50	
		28.54	
	0.44	29.70	29.71
		29.64	
		29.87	
		29.69	
		29.64	

Tabela 04 – Dados da Calibração de Laboratório – Solo de armazenamento e liberação

SOLO	UMID. VOL.	PERÍODO LIDO (μs)	PERÍODO CONSIDERADO (μs)
SOLO DE ARMAZENAMENTO E LIBERAÇÃO	0.09	20.32	20.41
		20.40	
		20.49	
		20.47	
		20.36	
	0.16	22.93	22.92
		22.90	
		22.87	
		22.99	
		22.94	
	0.23	24.79	24.82
		24.77	
		24.75	
		24.94	
		24.86	
	0.29	27.40	27.39
		27.38	
		27.29	
		27.40	
		27.46	
	0.34	29.22	29.44
		29.57	
		29.24	
		29.60	
		29.55	
	0.40	31.34	31.33
		31.24	
		31.16	
		31.49	
		31.44	

Tabela 05 – Dados da Calibração de Laboratório – Rejeito

SOLO	UMID. VOL.	PERÍODO LIDO (μs)	PERÍODO CONSIDERADO (μs)
REJEITO	0.06	23.95	23.85
		23.75	
		23.99	
		23.86	
		23.67	
	0.15	29.39	29.41
		29.61	
		29.41	
		29.34	
		29.30	
	0.29	37.54	37.49
		37.39	
		37.42	
		37.75	
		37.35	

Continuação da Tabela 05 – Dados da Calibração de Laboratório – Rejeito

SOLO	UMID. VOL.	PERÍODO LIDO (μ s)	PERÍODO CONSIDERADO (μ s)
REJEITO	0.47	43.83	43.57
		43.87	
		43.25	
		43.46	
		43.42	

A partir dos dados apresentados na Tabela 03, Tabela 04 e Tabela 05, foram traçados gráficos para cada material e pode-se definir uma reta ou curva a partir de regressão. Estas curvas estão apresentadas nos resultados.

4 METODOLOGIA CALIBRAÇÃO DE CAMPO

Após a realização da calibração de laboratório, foram escavados nos perfis de cobertura de solo alguns poços para instalação dos sensores (Figura 04) e posteriormente os poços foram reaterrados nas mesmas condições anteriores a abertura dos mesmos. As profundidades em que cada sensor foi instalado foram registradas.



Figura 04 – Sensores instalados no perfil de cobertura.

Com o intuito validar as umidades lidas pelos sensores utilizando-se a calibração de laboratório, procedeu-se a coleta de amostras nas mesmas profundidades onde os sensores foram instalados.

Para obtenção das amostras em profundidade, foi utilizado trado manual com diâmetro de 100mm (Figura 05). Os furos eram realizados nas proximidades de onde os sensores estavam instalados (distante cerca de 1,5m) e eram paralisados ao atingirem as profundidades onde havia algum sensor. Para cada sensor foram coletadas duas amostras de solo deformadas para medição de umidade gravimétrica. No mesmo horário em que as amostras eram coletadas, os valores medidos pelos sensores também foram lidos e anotados para comparação.

As amostras coletadas foram transportadas até o laboratório da Loctest em Belo Horizonte para medir as suas umidades gravimétricas. As umidades gravimétricas foram transformadas em umidades volumétricas a partir da caracterização dos solos e foram obtidos pares de leituras de período e umidades para cada solo. Estes procedimentos de coleta para calibração de campo foram semelhantes aos adotados em Amorim (2008), Ribeiro (2011) e Silva (2014).



Figura 05 – Furo com trado manual

5 RESULTADOS

Apesar de terem sido coletadas amostras apenas no final do período chuvoso, os dados lidos pelos sensores, previamente calibrados em laboratório, foram comparados aos dados de umidade das amostras coletadas em campo e organizados em gráficos, conforme apresentado na Figura 06, Figura 07 e Figura 08.

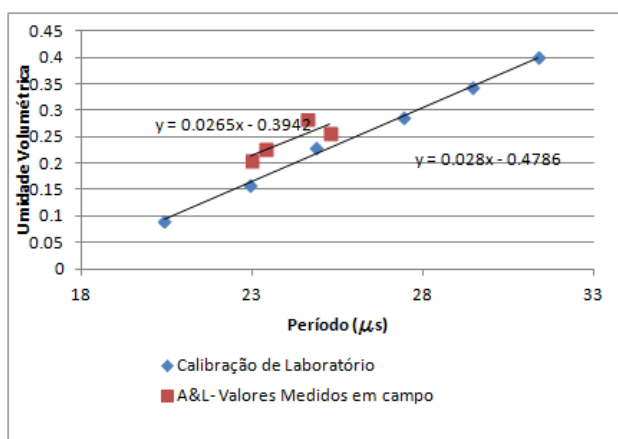


Figura 06 – Comparação da Calibração Campo x Laboratório para camadas de A&L.

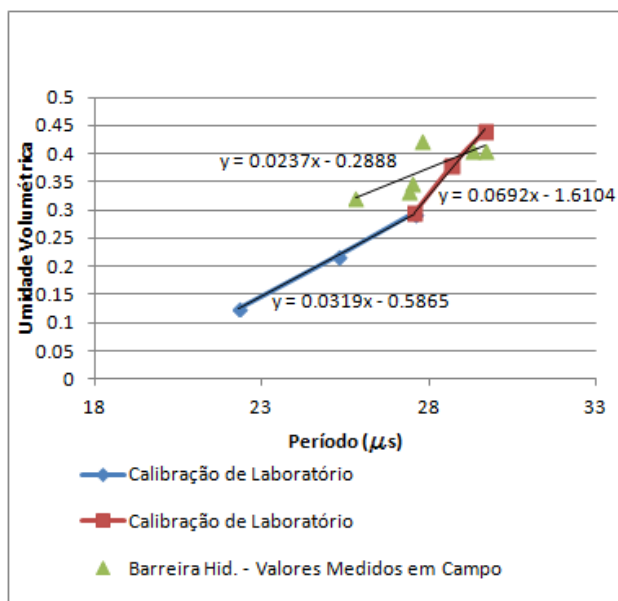


Figura 07 – Comparação da Calibração Campo x Laboratório para camadas de BH.

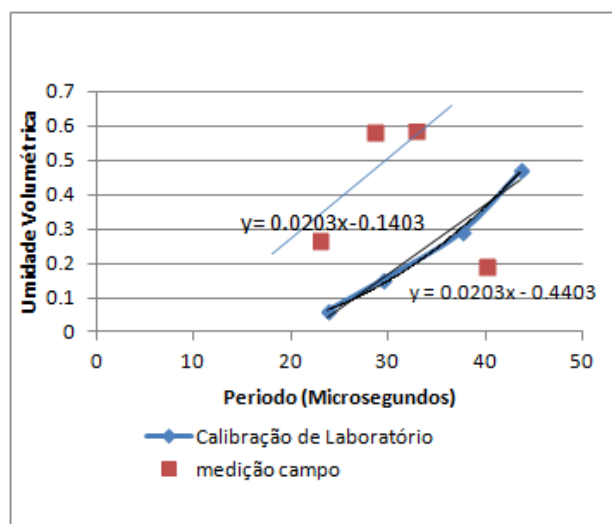


Figura 08 – Comparação da Calibração Campo x Laboratório para camadas de rejeito.

Foi possível observar que alguns valores medidos no laboratório e lidos pelos sensores se aproximaram, porém alguns ficaram bastante diferentes. Os valores das camadas de armazenamento e liberação (A&L) e barreira hidráulica (BH) apresentaram valores mais coerentes, porém os valores dos sensores instalados no rejeito apresentaram maiores variações.

Acredita-se que estas variações podem ser explicadas pela diferença entre as condições reproduzidas dos solos em laboratório e aquelas executadas em campo.

A calibração de campo realizada contemplou a coleta de umidades no final do período chuvoso (mês de março). Para obter a calibração completa é necessário obter novos valores de umidade para o período de seca.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresenta os primeiros dados referentes às calibrações de laboratório e de campo, bem como comparações entre os resultados obtidos com elas.

A partir dos dados apresentados nos gráficos, foi possível perceber que para os materiais denominados armazenamento e liberação

(A&L) e barreira hidráulica (BH), os valores lidos pelos sensores e os valores das umidades das amostras coletadas estavam razoavelmente parecidos, salvo alguns poucos pontos que apresentaram maiores diferenças.

Por outro lado, ao comparar as leituras dos sensores com as umidades obtidas para o rejeito é possível notar uma discrepância maior que deverá ser melhor compreendida com a coleta de amostras na estação seca, em meados de agosto de 2016.

Faz-se, portanto, necessário aguardar esta próxima coleta de amostras em profundidade, na qual se espera obter valores de umidade menores para que se possa concluir a calibração de campo. Até que esta calibração seja concluída, sugere-se utilizar as curvas de calibração preliminares para avaliar a variação de umidade no solo com o tempo.

Diferentemente do que foi realizado nesta calibração preliminar, após a futura coleta dos dados no período seco, será possível calibrar cada sensor separadamente, pois para cada um deles será possível traçar uma reta passando por dois pontos com umidades distintas. Deste modo, espera-se contornar possíveis causas da discrepância observada, tais como heterogeneidade entre diferentes pontos em um mesmo material.

REFERÊNCIAS

- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de Solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro, 2004. 09 p.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984a. 06 p.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo: Determinação do limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b. 03 p.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984c. 13 p.
- AMORIM, N.R. *Avaliação do Desempenho de Sistemas de Cobertura na Mina Rio Paracatu Mineração (RPM)*. 2008. 143 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa,

Viçosa, 2008.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. Instruction Manual: CS616 and CS625 Water Content Reflectometer. Revision 2/16, Logan, 2015. Disponível em <<http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cs616.pdf>>. Acesso em 01 mai. 2016.

RIBEIRO, A.G.C. *Metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura com base em estudo de caso realizado na mina da empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu, Minas Gerais*. 2011. 161 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

SILVA, G.L.A. *Comparação Entre Modelagem Numérica e Experimento de Campo em Escala Real para um Sistema de Cobertura na Mina Fazenda Brasileiro (Bahia)*. 90 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.