

## Proposta de motorização do aparelho de Casagrande para a determinação do limite de liquidez do solo

## Proposal of Casagrande apparatus motorization to determining a soil liquid limit

### RESUMO

Diariamente são noticiados desabamentos de edificações e desmoronamentos de encostas. Um importante fator neste contexto é a consistência do solo e os teores de umidade característicos para mudança dos estados do solo. Este projeto propôs a motorização do aparelho de Casagrande e a redução de fatores físicos e subjetivos no processo de determinação do limite de liquidez do solo. Foram avaliadas diferentes alternativas para compor a solução, envolvendo a plataforma Arduino, motores, sensores e elementos mecânicos para controlar o aparelho original. Ao final destas avaliações, contudo, devido à pandemia provocada pelo Corona vírus (COVID-19), o projeto não pôde ser executado conforme planejado e com a geração dos produtos esperados. Mesmo assim, as etapas executadas contribuíram muito para o aprendizado do acadêmico e para a continuidade (quando possível) do projeto, pois muitas das avaliações necessárias foram realizadas e auxiliaram na tomada de decisão quanto a pequenas partes da solução. Assim que possível, serão executados o acoplamento da solução ao aparelho de Casagrande e adicionada a tomada de decisão da parada do sistema por meio de visão computacional.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estados do solo. Desastres naturais. Segurança pública. Automação.

### ABSTRACT

Collapses of buildings and slopes are daily reported. An important issue in this context is soil consistency and the humidity levels that define a soil states changing. The project aims to motorize the Casagrande apparatus and reduce physical and subjective factors in the process of determining the soil liquidity limit. To do so, different alternatives were evaluated to compose the solution, which involved the Arduino platform, motors, sensors and mechanical elements to control the original device. At the end of these evaluations, however, due to the pandemic caused by the Corona virus (COVID-19), this project could not be carried out as planned and with the generation of the expected products. Even so, the steps performed contributed a lot to the academic learning and to the continuity (when possible) of the project, since many of the necessary evaluations were carried out and helped in the decision making regarding small parts of the solution. As soon as possible, we will do the coupling of the solution to the Casagrande apparatus, and add the decision taking regarding the stoppage of the system through computer vision.

**KEYWORDS:** Soil states. Natural disasters. Civil defense. Automation.

**Adriano Poier**  
[adrianopoier@gmail.com](mailto:adrianopoier@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Marcos Vinicius Schlichting**  
[mvinicius@utfpr.edu.br](mailto:mvinicius@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Wilson Leobet**  
[wleobet@utfpr.edu.br](mailto:wleobet@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**José Vergara Dietrich**  
[vergara@utfpr.edu.br](mailto:vergara@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Fabio Alexandre Spanhol**  
[faspanhol@utfpr.edu.br](mailto:faspanhol@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Jefferson Gustavo Martins**  
[martins@utfpr.edu.br](mailto:martins@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Quase que diariamente são noticiados diferentes fatos relativos a desabamentos de edificações e desmoronamentos de encostas. Normalmente, tais fatos são decorrentes de negligências e problemas relativos a projetos, execuções e manutenções de obras. Dentre as possíveis causas dos desabamentos e desmoronamentos está o excessivo teor de umidade no solo, além das condições de relevo, clima e do próprio tipo do solo que pode acelerar e agravar tais problemas. Cancian (2013) declara que é possível encontrar na comunidade acadêmica mundial e nacional algumas pesquisas acerca da influência de diferentes parâmetros nas edificações. Dentre eles, tem-se a tipologia do solo, a umidade, a quantidade de cimento e os aditivos especiais.

A engenharia define solo como “um agregado não cimentado de grãos minerais e matéria orgânica decomposta (partículas sólidas), com líquido e gás preenchendo os espaços vazios existentes entre as partículas sólidas” (DAS, 2016, p. 1). Por ser empregado como material de construção e sustentação de fundações estruturais, é importante conhecer suas propriedades, dentre as quais destaca-se origem, distribuição do tamanhos dos grãos, permeabilidade, compressibilidade, resistência ao cisalhamento e capacidade de carga (DAS, 2016).

Diferentes subáreas da Engenharia Civil estudam as propriedades e os cenários citados na tentativa de identificar melhores alternativas para o setor da construção civil. Além disso, buscam-se garantias quanto à segurança daqueles que utilizam as construções com a finalidade de habitação ou trabalho, bem como daqueles que circundam as proximidades de tais edificações. Inserido no cenário brevemente descrito, este trabalho foca o desenvolvimento de uma solução que automatiza o método proposto por Casagrande, descrito a seguir.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Em 1911, Atterberg definiu os limites de consistência do solo e métodos para sua determinação. Estes permitem a definição dos teores de umidade característicos para mudança dos estados do solo: sólido, semissólido, plástico e líquido. No estado sólido, o solo não sofre mais variação volumétrica. Embora já apresente características sólidas, no estado semissólido o solo ainda apresenta retração durante a secagem. No estado plástico, o solo se apresenta com característica moldável. Por fim, um solo se apresenta no estado líquido quando tem a aparência fluida ou de lama (MBAGWU; ABEH, 1998).

O Limite de Contração (LCo) determina o limite entre os estados semissólido e sólido. Abaixo do limite de contração não há mais diminuição de volume do solo durante a secagem. O Limite de Plasticidade (LP) define o limite entre os estados plástico e semissólido. O Limite de Consistência (LCo) determina os limites entre os vários estados de consistência dos solos argilosos. Por fim, o Limite de Liquidez (LL) determina o limite entre os estados líquido e plástico (ABNT, 1995, p. 15).

Sewell e Mote (1969) afirmam que o LL pode ser um indicador da permeabilidade do solo. Além disso, em estudos geotécnicos, a correlação entre LL e LP tem grande aplicação em avaliações de solo para uso em fundações,

construções de estradas e estruturas para armazenamento e retenção de água (MBAGWU; ABEH, 1998). A determinação de LL e LP são definidas pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6459:2017 e NBR 7180:2016, respectivamente (ABNT, 2016, 2017).

Segundo a norma da ABNT NBR 6502:1995, o teor de umidade é caracterizado pela “relação entre a massa de água contida nos vazios de um solo e a massa das partículas sólidas (grãos), expressa em porcentagem (ABNT, 1995, p. 18). Em conjunto com a definição de plasticidade do parágrafo anterior, identifica-se que o teor de umidade é um dos principais elementos que influenciam na alteração entre os estados do solo previamente definidos. Além disso, quanto maior o teor de umidade no solo, mais próximo este estará do estado líquido e maiores serão os riscos de deslizamentos de encostas ou comprometimento de barragens.

Diante do exposto, este trabalho tem como o foco o método proposto por Casagrande como alternativa àquele proposto por Atterberg para a determinação do LL, sendo este o método mais utilizado dentre aqueles conhecidos e que têm a mesma finalidade (SOUZA et al., 2000). Em seus estudos, Melo (2014) alcançou resultados semelhantes por meio deste e também por meio de novos métodos. Mais especificamente, este trabalho foca a automação do aparelho (Figura 1) criado em 1932 por Arthur Casagrande para auxiliar a execução de seu método.

Figura 1 – Aparelho proposto por Casagrande: (a) concha fixada à base de borracha; (b) e (c) exemplos de cinzéis.



Fonte: Autoria própria (2020).

O referido aparelho é composto por uma concha de latão e uma base de borracha rígida (ebonite). Após o preparo da pasta de solo homogeneizada, o primeiro passo é colocá-la na concha (Figura 1.a). Em seguida, realiza-se uma ranhura no centro da amostra para separar totalmente a pasta de solo em duas partes. Tal ranhura é realizada com um cinzel padrão, tais como os apresentados nas Figuras 1.b e 1.c. O processo continua com a movimentação da manivela a uma velocidade constante de 120 RPM (rotações por minuto). Um came (elemento em formato ovalado), fixado no mesmo eixo da manivela, produz a elevação e a queda abrupta da concha. Enquanto a manivela é movimentada, as sucessivas elevações e quedas da concha fazem com que a pasta de solo vá cedendo e se acomodando. Os movimentos devem continuar até que as partes inicialmente separadas voltem a ter exatos 13 mm de contato, momento em que

o ensaio deve ser interrompido para a contagem de golpes da concha que determinarão o parâmetro LL (ABNT, 2017).

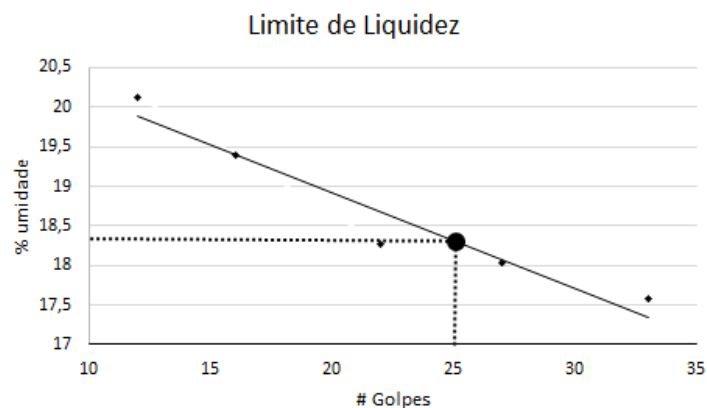
Os passos descritos devem ser realizados M vezes, sendo que em cada uma a pasta de solo deve conter um diferente teor de umidade  $W_k$  ( $k = [1..M]$ ). O cálculo de  $W_k$  é dado pela Eq. 1, na qual  $P_{\text{água}}$  e  $P_{\text{solo_seco}}$  representam os pesos da água e do solo seco na pasta de solo utilizada. Para cada execução k, a variação de  $P_{\text{água}}$  gera um novo valor para  $W_k$  e é necessário uma quantidade de golpes  $N_k$  diferente das demais execuções para a acomodação da pasta de solo. Os pares  $W_k$  e  $N_k$  obtidos em cada execução k devem ser anotados. Ao final das execuções, a relação entre os  $W_k$  e  $\log(N_k)$  será avaliada por meio de um gráfico (Figura 2). Neste gráfico, o eixo das ordenadas (em escala linear) corresponde às quantidades de golpes e o das abscissas (em escala logarítmica) se refere aos teores de umidade correspondentes. A partir dos pontos do gráfico, ajusta-se uma reta chamada Curva de Fluidez, cuja inclinação (Eq. 2) determina o Índice de Fluidez (IF).

Para o cálculo de IF entre duas execuções i e j quaisquer, utiliza-se  $N_i$  e  $N_j$  e os teores de umidade  $W_i$  e  $W_j$ . Tomando o gráfico da Figura 2, LL é definido como o valor  $W_k$  no par ordenado  $(\log(N_k), W_k)$ , tal que  $N_k$  seja igual a 25 e o referido par ordenado pertença à Curva de Fluidez (ABNT, 2017).

$$W_k = \frac{P_{\text{água}}}{P_{\text{solo_seco}}} * 100 \quad (1)$$

$$IF = \frac{W_i - W_j}{\log \frac{N_j}{N_i}} \quad (2)$$

Figura 2 – Exemplo de gráfico para determinação de LL.



Fonte: Autoria própria (2020).

Considerando o cenário descrito, o presente projeto focou na redução do número de etapas executadas manualmente e sua influência nos resultados finais. Tal influência compreende questões como a subjetividade do especialista humano e as próprias características do processo (repetitivo, monótono e demorado), além de requerer alto grau de concentração. Este conjunto de exigências sobrecarrega o profissional que realiza a inspeção e o leva a possíveis



distrações e baixas taxas de acerto (CONNERS *et al.*, 1997; PHAM e ALCOCK, 1997; RADOVAN *et al.*, 2001).

O projeto, como um todo, tem duração de 24 meses. A motorização do Aparelho de Casagrande compreende a primeira fase do projeto e busca eliminar a ação humana na movimentação da manivela. A segunda fase utilizará visão computacional para determinar o momento de parada da movimentação da concha. Inicialmente, serão realizados estudos quanto ao método e às ferramentas a serem utilizadas. A redação de relatórios, artigos e registros de propriedade intelectual ocorrerá em paralelo às demais atividades durante todo o projeto.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho descreve as atividades planejadas para os primeiros 12 (doze) meses do projeto:

- a) Realização de estudo dos métodos disponíveis para determinar o limite de liquidez do solo, vantagens e desvantagens, em especial o proposto por Casagrande.
- b) Estudo da ferramenta Arduino. E
- c) Projetar, implementar e validar uma proposta de motorização do método proposto por Casagrande.

Basicamente, a primeira etapa foi caracterizada por pesquisas teóricas na bibliografia da área. Além do método de Casagrande, outra alternativa para determinar o LL é um método de penetração de cone, o qual utiliza materiais distintos do primeiro, mas apresenta semelhanças com relação aos procedimentos executados.

Num segundo momento, realizou-se um levantamento das diferentes versões da plataforma Arduino e suas características, a qual é composta por um conjunto de dispositivos baseados em um microcontrolador. Um microcontrolador é um componente eletrônico que possui um processador, memória, e portas de entrada e saída para interação com outros componentes. Tais componentes destinam-se principalmente ao controle de equipamentos eletrônicos e também incluem um software gratuito para computadores por meio do qual é possível criar o *firmware* para o microcontrolador. Para a fase de prototipagem foi escolhido o Arduino Pro Mini, sendo necessário as 10 portas digitais ao todo, 1 para o controle do motor utilizando acionamento por PWM, 1 para a leitura do sensor, 3 para os botões e 5 para a comunicação com a tela. A escolha deste microcontrolador se deu devido a sua disponibilidade, mas possível que seja alterado para o Arduino Nano futuramente, devido a sua conexão mais acessível (USB).

A identificação da versão Arduino mais adequada para o projeto ocorreu em conjunto com a definição dos demais elementos. Diferentes motores foram testados, dentre os quais, motor de passo e motor de corrente contínua. A função do motor é substituir o acionamento manual da manivela do aparelho de Casagrande e garantir que a velocidade de 120 RPM seja mantida no decorrer de todo o ensaio e para todas as amostras de solo, indiferentemente do teor de

umidade utilizado. Ou seja, o sistema automatizado deve rejeitar eventuais perturbações de carga e manter sempre 120 RPM.

Após testes com motores de passo e de corrente contínua, optou-se pelo segundo. O motor de corrente contínua escolhido opera na faixa de 3 a 6 volts e possui um caixa de redução acoplada de forma que a velocidade máxima do motor é de aproximadamente 190 RPM. Para fazer o controle de velocidade deste tipo de motor pode ser utilizada a técnica de modulação de largura de pulso (PWM). A técnica de PWM consiste em enviar pulsos ao motor cuja duração seja variável. Outro ponto importante é que se faz necessário manter o torque do motor em valores aceitáveis. Tipicamente, para manter o torque a faixa de da razão cíclica deve estar entre 30% e 100%. Levando em conta a facilidade de acionamento de um motor DC via PWM e seu baixo custo de implementação, esta foi a técnica utilizada neste trabalho.

O método determina que a velocidade do Aparelho de Casagrande, e neste caso do motor, deve ser mantida constante, tal que se tenha ao final 120 RPM. Consequentemente, faz-se necessário medir e controlar tal velocidade. Foram avaliadas 2 alternativas para esta finalidade, isto é, um botão (micro switch mecânico) e um sensor infravermelho de barreira. Para o primeiro, havia casos em que a cada volta o motor acionava o botão duas vezes. Já os testes realizados com o segundo mostraram que esta seria uma alternativa satisfatória. O sensor de velocidade também é utilizado para contagem de batidas da concha, pois este é igual ao número de voltas. É possível calcular o número de voltas pela somatória do número de interrupções recebidas dividido pela quantidade de interrupções por revolução.

A Figura 3 apresenta o protótipo utilizado para a avaliação da solução. A tela escolhida foi o LCD Nokia 5110 devido à relação entre seu custo e seus benefícios. Esta possui área útil para 6 linhas, com 14 caracteres cada, bem como iluminação. A função da tela é mostrar a quantidade de batidas da concha, e, adicionalmente, a velocidade do motor (em RPM) para ajudar o usuário a notar anormalidades na operação, caso haja algum problema. A automação conta com três botões, para iniciar e encerrar o processo, zerar o contador de batidas, e alternar entre menus de configurações previstos em futuras atualizações de *firmware*. Após a validação realizada previamente, os próximos passos seriam a construção de uma placa de circuito impresso (Printed Circuit Board - PCB). No entanto, pelo mesmos motivos expostos na seção Acoplamento, não foi possível tal construção até o momento.

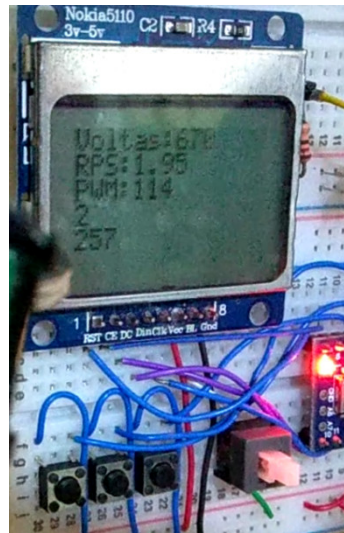
Para o acoplamento da solução ao Aparelho de Casagrande, a solução deverá permitir fácil conexão e desconexão com o eixo e a base do aparelho. Tal necessidade é decorrente do fato de que o processo pode ser caracterizado pela umidade e sujeira das amostras de solo, impondo a obrigatoriedade de limpeza do Aparelho de Casagrande a cada execução.

Devido à pandemia provocada pelo Corona vírus (COVID-19), e a necessidade de isolamento social, houve o fechamento dos estabelecimentos relacionados a indústria, comércio e serviços por longos períodos no ano de 2020 por todo o Brasil. Justamente neste período estava programado a fase de projeto e execução do acoplamento entre o aparelho de Casagrande e a solução proposta.

Basicamente, no ano de 2020, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), assim como demais instituições de ensino, estava com suas

dependências fechadas e o acesso restrito a funcionários e alunos. A necessidade de acesso a laboratórios e equipamentos, bem como a interação com técnicos de laboratório, para a execução testes e adequações de um possível protótipo, impossibilitou a conclusão do projeto conforme programado com relação à construção de uma solução completa e finalizada.

Figura 3 – LCD utilizado montado em uma protoboard.



Fonte: Autoria própria (2020).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho focou a motorização do aparelho de Casagrande e está englobado em um projeto maior para a automação deste aparelho por meio de visão computacional. Devido à pandemia provocada pelo Corona vírus (COVID-19), o projeto não pode ser executado conforme planejado e com a geração dos produtos esperados. Mesmo assim, as etapas executadas contribuíram muito para o aprendizado do acadêmico e para a continuidade (quando possível) do projeto, pois muitas das avaliações necessárias foram realizadas e auxiliaram na tomada de decisão quanto a pequenas partes da solução.

Assim que possível, os próximos passos do projeto compreenderão justamente o acoplamento da solução ao aparelho de Casagrande, o que não foi possível em decorrência dos fatos já expostos. Além disso, também se tem a perspectiva de automação do referido aparelho com a inclusão de tomada de decisão quanto à parada do sistema por meio de visão computacional.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação Araucária por meio do provimento de bolsas de iniciação científica. Também cabe aqui agradecimentos aos docentes Dr. Jefferson Gustavo Martins, Dr. Fabio Alexandre Spanhol e Dr. José Vergara Dietrich pela oportunidade e orientação, bem como o apoio incondicional dos técnicos de laboratório Marcos Vinícius Schlichting e Wilson Leobet. Sem este suporte, não seria possível o desenvolvimento do projeto.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT 7180**: Solo: determinação do limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT 6459**: Solo: determinação do limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

CANCIAN, M. A. **Influência do teor de umidade, porosidade e do tempo de aplicação na mistura solo-cimento para pavimento rodoviário de um solo da bacia do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2013.

CONNERS, R. W.; KLINE, D. E.; ARAMAN, P. A.; DRAYER, T. H. Machine vision technology for the forest products industry. **Computer**, v. 30, n. 7, p. 43-48, 1997.

DAS, M. B. **Principles of Foundation Engineering**. 8.ed. Boston: Cengage Learning, 2016.

MBAGWU, J. S. C.; ABEH, O. G. Prediction of engineering properties of tropical soils using intrinsic pedological parameters. **Soil Science**, Baltimore, v.163, n. 2, p. 93-102, 1998.

MELO, D. F. M. **Comportamento Reológico de solos sujeitos a corridas de lama por liquefação estática**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas e Geotécnica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

PHAM, D. T.; ALCOCK, R. J. Automated visual inspection of birch wood boards. **IEE Colloquium on Artificial Intelligence in Manufacturing**, p. 1-4, 1997.

RADOVAN, S.; GEORGE, P.; PANAGIOTIS, M.; MANOS, G.; ROBERT, A.; IGOR, D. An approach for automated inspection of wood boards. **International Conference on Image Processing**, 1, p. 798-801, 2001.

SEWELL, J. I.; MOTE, C.R. Liquid-limit determination for indicating effectiveness of chemicals in sealing. **Transaction of the ASAE**, v. 12, n. 5, p. 611-613, 1969.

SOUZA, C. M. A; RAFULL, L. Z. L.; VIEIRA, L. B. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 460-464, 2000.