

Desenvolvimento e Validação de Protótipo "Mini-Proctor" para Compactação de Solos

**Miguel Batista de Oliveira¹, Vilson Machado Tombezi², Gihad Mohamad³,
Nicolí Justen⁴, Leonardo Landi do Nascimento Penso⁵, Jamile Lopes Brum
Brandão⁶**

*¹ Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil
(oliveira.miguel@acad.ufsm.br)*

*^{2,3,4,5,6} Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria,
Brasil*

Resumo: Este estudo avalia o protótipo "Mini-Proctor" (impresso em 3D) como alternativa ao ensaio de compactação convencional da NBR 7182:2025. Com calibração física ajustada para energia de 600 kJ/m³, o dispositivo foi testado com amostras de 6,0 kg e 600 g. No lote de 6,0 kg, obteve-se desvio de apenas 0,40% na densidade seca máxima e de +0,15% na umidade ótima em relação ao método manual. O protótipo mostrou-se viável, preciso e garante expressiva redução de tempo, esforço físico e consumo de solo.

Palavras-chave: Digite as palavras-chaves separadas por ponto e vírgula (;), máximo 5 palavras-chave

INTRODUÇÃO

A determinação da umidade ótima e do índice de compactação dos solos é um ensaio fundamental para obras de pavimentação. Contudo, o procedimento convencionalizado pela NBR 7182:2025 impõe limitações práticas devido ao esforço físico exigido, à alta repetibilidade e ao elevado consumo de material, fator crítico ao se trabalhar com amostras de alto valor agregado em laboratório. Diante disso, o uso de equipamentos

em escala reduzida apresenta-se como uma alternativa vantajosa, pois otimiza o tempo de execução e diminui consideravelmente o volume de solo necessário por ensaio.

Apesar dos benefícios, a redução da escala impõe restrições granulométricas ao material ensaiado. Enquanto a norma NBR 6457:2024 limita o uso do cilindro pequeno convencional para solos retidos na peneira de 4,75 mm, o uso de um



protótipo micro-reduzido restringe a granulometria máxima a partículas de 2,0 mm.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo geral validar o protótipo de compactação reduzida, denominado "Mini-Proctor", comparando seus resultados com o método Proctor Normal convencional. Especificamente, busca-se avaliar a acurácia, a repetibilidade e a viabilidade técnica do equipamento, calibrado para operar com energia equivalente à Energia Normal (aproximadamente 600 kJ/m³) e utilizando amostras de 6,0 kg, tendo como parâmetros de validação a Massa Específica Seca Máxima ($\rho_{d,max}$) e a Umidade Ótima (w_{ot}). Por fim, pretende-se identificar as limitações operacionais do protótipo e propor recomendações para sua aplicação prática em rotinas laboratoriais.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a validação científica de equipamentos de compactação miniaturizados, a literatura geotécnica internacional adota como critérios de aceitação um erro relativo de até $\pm 2,0\%$ para a massa específica seca máxima e de até $\pm 1,5\%$ para a umidade ótima, em relação ao ensaio normatizado padrão. Embora a ABNT

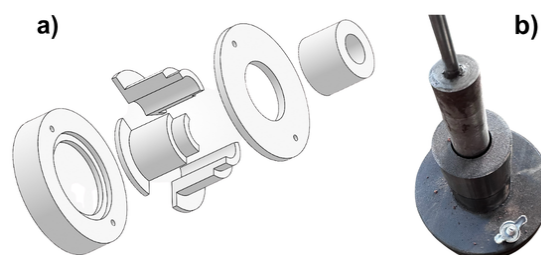
NBR 7182:2025 não estipule uma margem de erro direta para homologação de novos aparelhos, ela define tolerâncias rigorosas para pesagem e precisão dos instrumentos.

Neste estudo, os ensaios realizados com o Mini-Proctor apresentaram excelente acurácia. A densidade seca máxima média obtida pelo protótipo (1,758 g/cm³) registrou um desvio de apenas 0,40% em relação ao método manual convencional (1,765 g/cm³) e de 1,18% comparado ao método mecânico (1,779 g/cm³), mantendo-se significativamente abaixo do limite de tolerância de 2,0%. Quanto à umidade ótima, o Mini-Proctor (15,25%) variou apenas +0,15% em relação ao método manual (15,10%) e +0,43% em relação ao mecânico (14,82%), oscilações consideradas desprezíveis e justificáveis pelas variações instrumentais de laboratório.

A precisão operacional do protótipo também foi confirmada pela análise de repetibilidade. O desvio padrão das três repetições com o Mini-Proctor foi de 0,004 g/cm³ para a densidade e de 0,05% para a umidade ótima, valores equivalentes ou estatisticamente superiores aos obtidos com os equipamentos normatizados (manual e mecânico). Essa estabilidade demonstra que o equipamento é imune a variações operacionais

aleatórias. Por fim, a calibração física adotada para o Mini-Proctor estruturada em 3 camadas com 6 golpes cada mostrou-se matematicamente exata. A correlação geométrica estabelecida entre a massa do mini-soquete, a altura de queda e o volume do mini-molde transferiu com sucesso a energia cinética necessária de aproximadamente 600 kJ/m^3 , produzindo um rearranjo estrutural e uma redução de vazios idênticos aos do ensaio macroscópico convencional.

A metodologia aplicada buscou atender aos critérios da NBR 7182:2025 para a determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima do solo. Os ensaios foram realizados simultaneamente no Laboratório de Solos do LMCC da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), utilizando três dispositivos: o equipamento convencional manual, o compactador mecânico (marca Owntec, modelo Bluevolution MS40, configurado para solo argiloso) e o protótipo em escala reduzida, denominado Mini-Proctor (figura 1a e b). O protótipo foi confeccionado em filamentos plásticos por meio de impressão 3D no Laboratório Fábrica CT da UFSM.



A coleta e a preparação do solo seguiram as diretrizes da NBR 6457:2024. Adotou-se o procedimento de ensaio com reúso de material e secagem prévia até a umidade higroscópica. Para mitigar o "efeito de escala de manuseio" e garantir a representatividade, preparou-se um lote homogêneo de estoque de 6,0kg para suprir os ensaios manual e mecânico. Desse lote, frações foram retiradas sem gerar depleção volumétrica severa ou distorcer a proporcionalidade da água. Adicionalmente, para o Mini-Proctor, preparou-se uma porção separada de 600g (dividida em 6 frações de 100g, mantendo o acréscimo de água em 2% do peso da amostra. Este material específico foi mantido em câmara climática a 24°C por 24 horas antes do ensaio, garantindo a completa homogeneização e evitando a perda de umidade por evaporação em função da quantidade reduzida de solo.

Os parâmetros operacionais do Mini-Proctor foram calculados com base na equação de energia de compactação:

$$E = \frac{P \times H \times N \times c}{V}$$

1

Onde E é a energia (600kJ/m³), P é o peso do soquete, H é a altura de queda livre, N é o número de golpes, c é o número de camadas (fixado em 3) e V é o volume útil interno do molde. Enquanto os aparelhos normatizados utilizam o pilão padrão de 2,5kg, o Mini-Proctor foi projetado com uma haste metálica guia e um pilão de 0,45kg. O protótipo impresso em 3D é composto por base de apoio, molde tripartido, cálice de colarinho e anel de segurança, incluindo uma placa metálica circular de 3mm de espessura na base do molde para absorver os impactos e proteger a estrutura plástica.

Todos os quatro ensaios ocorreram no mesmo dia e local para neutralizar variáveis ambientais. Após a compactação, as amostras foram extraídas e secas em estufa a 105°C por 24 horas até atingirem massa constante para a determinação da umidade ótima (w_{ot}), permitindo a posterior comparação dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios de compactação revelam uma excelente convergência entre os métodos

convencionais e o protótipo Mini-Proctor. Quando utilizado o lote de estoque de 6.000 g, a massa específica seca máxima ($\rho_{d,max}$) média obtida no Mini-Proctor foi de 1,758 g/cm³ (desvio padrão de 0,004 g/cm³), apresentando um desvio relativo de apenas 0,40% em relação ao Proctor Manual (1,765 g/cm³) e de 1,18% em relação ao Proctor Mecânico (1,779 g/cm³). Quanto à umidade ótima (w_{ot}), o protótipo com lote de 6.000 g registrou média de 15,25% (desvio padrão de 0,05%), o que representa uma variação absoluta de apenas +0,15% comparado ao ensaio manual (15,10%) e de +0,43% em relação ao mecânico (14,82%). Sob a ótica da mecânica dos solos, esses resultados são estatisticamente idênticos, comprovando a exatidão da calibração física adotada para o Mini-Proctor (3 camadas e 6 golpes) e a correta transferência de energia de compactação de aproximadamente 600 kJ/m³.

No ensaio complementar realizado com a amostra reduzida de 600 g preparada em separado, obteve-se uma densidade seca máxima de 1,735 g/cm³ e umidade ótima de 19,20%. Embora a umidade tenha apresentado uma elevação devido à maior sensibilidade térmica e de homogeneização de porções menores de água em amostras miúdas, a



densidade obtida divergiu apenas 1,70% do método manual, mantendo-se dentro do limite de erro de 2,0% aceito na literatura geotécnica internacional. Esse comportamento valida a proposta de preparação em frações de 600g seguindo rigorosamente os procedimentos de umedecimento prévio em câmara climática da NBR 7182:2025 para mitigar perdas por evaporação. Diante do exposto, o Mini-Proctor consolida-se como uma alternativa viável e precisa para a substituição dos métodos tradicionais, oferecendo vantagens significativas em termos de redução do volume de material necessário, facilidade de execução física e ganho de tempo pela alta repetibilidade operacional em laboratório.

CONCLUSÃO

Os resultados experimentais e as análises estatísticas confirmam que o protótipo "Mini-Proctor" possui pleno potencial para reproduzir satisfatoriamente os parâmetros de compactação da NBR 7182:2025. A calibração física adotada (3 camadas e 6 golpes por camada) mostrou-se perfeitamente exata para atingir a Energia Normal de compactação. Essa equivalência rigorosa aos métodos normatizados foi plenamente validada tanto no controle estrito de umidade com o lote de estoque de

6.000 g que mitigou o efeito de escala no manuseio, quanto no ensaio com a amostra reduzida de 600 g, desde que mantidos o protocolo de homogeneização prévia e a vedação contra perdas de água por evaporação. Diante disso, conclui-se que o Mini-Proctor é um equipamento técnico e cientificamente viável para substituir os ensaios macroscópicos convencionais, otimizando o tempo operacional e gerando expressiva economia de insumos em laboratório.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório FÁBRICA CT pela confecção do equipamento em escala reduzida.

Ao laboratório de Solos do LMCC da UFSM pelo espaço cedido para os ensaios e o uso dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7182: Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro: 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: 2024.

Humboldt. (2003). Manual de Instruções H-4165: Aparelho de Compactação em Miniatura Harvard. Norridge, Illinois: Humboldt e Distribuidores Autorizados em todo o mundo.

