

ESTUDO E MODELAGEM DA RECONSTITUIÇÃO DE SOLOS POR COMPACTAÇÃO QUASE ESTÁTICA

Alexandre Garcês de Araujo¹
Marta Pereira da Luz²
Vlãdia Correchel³
Marcelo Tsuyoshi Haragushi⁴
Fernando Ernesto Ucker⁵

RESUMO

A reconstituição de solos em laboratório pode ser feita utilizando-se diferentes métodos de compactação. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar as principais variáveis do processo de reconstituição de solos por compactação quase-estática. Foram avaliadas a velocidade de compactação, a espessura da camada compactada, a energia decomposta em total, acomodação, elástica e efetiva e a umidade de preparação. Também foi feita a comparação da curva, densidade seca e umidade, com os resultados da compactação padrão Proctor. Uma alternativa de análise foi proposta e mostrou excelentes resultados em comparação com a curva padrão Proctor.

Palavras-chave: velocidade de compactação, altura da camada, umidade de compactação, energia de compactação

STUDY AND MODELING RECONSTITUTION OF SOILS THROUGH QUASI-STATIC COMPACTION

ABSTRACT

Reconstituting soils in laboratory may be done using different compaction methods. In this way, this study aims to evaluate the main variables of soil reconstitution process through quasi-static compaction. Compaction speed, compacted layer thickness, total decomposed energy, elastic and effective settlement, and preparation humidity were evaluated. The curve, dry density and humidity were also compared to the results of Proctor standard compaction. An alternative analysis was proposed, which showed excellent results compared to the standard Proctor curve.

Keywords: compaction speed, layer height, compaction moisture, compaction energy.

Recebido em 26 de julho de 2023. Aprovado em 24 de novembro de 2023

¹ Universidade Estadual de Goiás, Departamento de Engenharia Civil, Anápolis. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, PPG MEPROS, Goiânia. E-mail: alexandre.araujot@ueg.br

² Pontifícia Universidade Católica de Goiás, PPG MEPROS, Goiânia. E-mail: marta.eng@pucgoias.edu.br

³ Universidade Federal de Goiás, Departamento Agronomia, Goiânia. E-mail: vladiacorrechel@hotmail.com.br

⁴ Universidade Estadual de Goiás, Departamento de Engenharia Civil, Anápolis. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, PPG MEPROS, Goiânia. E-mail: haramt@yahoo.com.br

⁵ Centro Universitário Araguaia, Goiânia. E-mail: ferucker@gmail.com

INTRODUÇÃO

O processo de compactação em campo possui a finalidade de melhorar as suas características mecânicas para diferentes tipos de construções. Esse processo consiste na rápida redução de volume de solos pela aplicação de um esforço de compactação que produza a expulsão de ar, sem alterar a quantidade de água (Raghavan and Ohu, 1985; Sharma et al., 2016; Zhemchuzhnikov et al., 2015). Por outro lado, solos são compactados no laboratório com a finalidade de reproduzir o próprio processo de compactação (Assouline et al., 1997). Além disso, solos podem ser compactados no laboratório com a finalidade de reconstituir solos naturais, para o estudo do seu comportamento (Alonso et al., 2011; HONG et al., 2010; LIN et al., 2012; Otálvaro et al., 2015; ZHAO et al., 2009). Este último processo é mais conhecido como “reconstituição” de solos.

A compactação ou reconstituição em laboratório precisa produzir um solo com características representativas daquelas do solo no campo. Um material representativo possui características físicas e propriedades que são semelhantes às daquele solo que se procura reproduzir. Para verificar tal representatividade diversas variáveis podem ser avaliadas. Pode-se comparar parâmetros de comportamento do material produzido em laboratório e originado no campo. Pode-se também investigar e comparar variáveis mais fundamentais, como a energia envolvida nos processos de compactação/reconstituição e as características físicas dos diferentes processos de densificação do solo. A compactação pode ser realizada no laboratório de maneira dinâmica utilizando o processo de aplicação de golpes em camadas, por vibração no caso de materiais sem coesão, ou de maneira quase-estática.

A compactação quase-estática surgiu como uma alternativa, em laboratório, para a compactação ou reconstituição de solos. Pode-se produzir corpos de prova com elevada homogeneidade e sob condições relativamente bem controladas de energia de compactação e índices físicos obtidos. Pode-se citar também a conveniência de se produzir corpos de prova acabados com dimensões finais especificadas e compatíveis com ensaios mecânicos pretendidos. Grande parte dos estudos existentes se objetivaram na comparação entre os métodos de compactação, na tentativa de obter correlações do peso específico seco máximo e umidade ótima entre os métodos (Bell, 1977; Doris Asmani et al., 2013; Ekwue, Edwain I.; Birch, Robert; Chewitt, 2015; Kell, 1964; Kenai et al., 2006; Kurucuk et al., 2008; Reddy and Jagadish, 1993; Seed, 1955; Zhang et al., 2005). Infelizmente, foram poucos os estudos publicados que avaliaram o processo de compactação estática (Sharma et al., 2016), que forneçam dados qualitativos a respeito das influências das diversas variáveis de execução da compactação (Zhemchuzhnikov et al., 2015), da forma de interpretação do processo de compactação, e o estudo detalhado da qualidade do produto acabado obtido.

Este trabalho apresenta um minucioso estudo da compactação ou reconstituição quase-estática de solos. É proposta uma metodologia para a modelagem do processo e é estabelecido um método de cálculo e interpretação dos resultados. A modelagem e interpretação do processo de densificação quase-estática é realizada sob a luz de conceitos como a energia total, energia elástica e energia efetiva e considerados fatores, como o atrito lateral e delimitação entre o final do processo quase-estático e o início da geração de poropressões de água positivas. Também é apresentada uma campanha de ensaios estabelecida de maneira a permitir a avaliação dos principais efeitos físicos do processo de compactação e reconstituição de solo, tais como a velocidade de deslocamento do pistão e a espessuras das camadas. Finalmente, propõe-se critérios de padronização do processo de reconstituição de amostras que maximizem a homogeneidade e repetibilidade do processo. Assim, fica evidente que diferentemente dos trabalhos disponíveis na literatura o objetivo deste estudo não é a comparação de propriedades do solo em diferentes métodos de reconstituição, objetivando-se exclusivamente no entendimento e modelagem do processo de reconstituição com compactação quase-estática, que possui lacunas ainda não estudadas.

Compactação Quase-Estática

No processo de compactação proctor, o cilindro possui um terço do diâmetro da seção transversal do molde (Figura 1a), assim grande parte da energia aplicada é perdida pelo deslocamento do solo nas proximidades do contato com o pistão (Bell, 1977; Yaghoubi et al., 2017). Por outro lado, no processo de compactação quase-estática o pistão possui área de seção transversal muito próxima da área da seção transversal do molde (Figura 1b), permitindo que a energia aplicada seja integralmente absorvida pelo sistema solo/molde. Além disso, o processo de aplicação da tensão com baixa velocidade, reduz a possibilidade de geração de poro pressões de água, desde que a velocidade seja baixa o suficiente para drenagem, deixando a energia aplicada ainda mais eficiente. O arranjo estrutural do solo reconstituído pelo processo de compactação quase-estática se assemelha melhor a de campo em comparação com a reconstituição pelo método do Proctor (Doris Asmani et al., 2011; Hafez et al., 2010; Reddy and Jagadish, 1993).

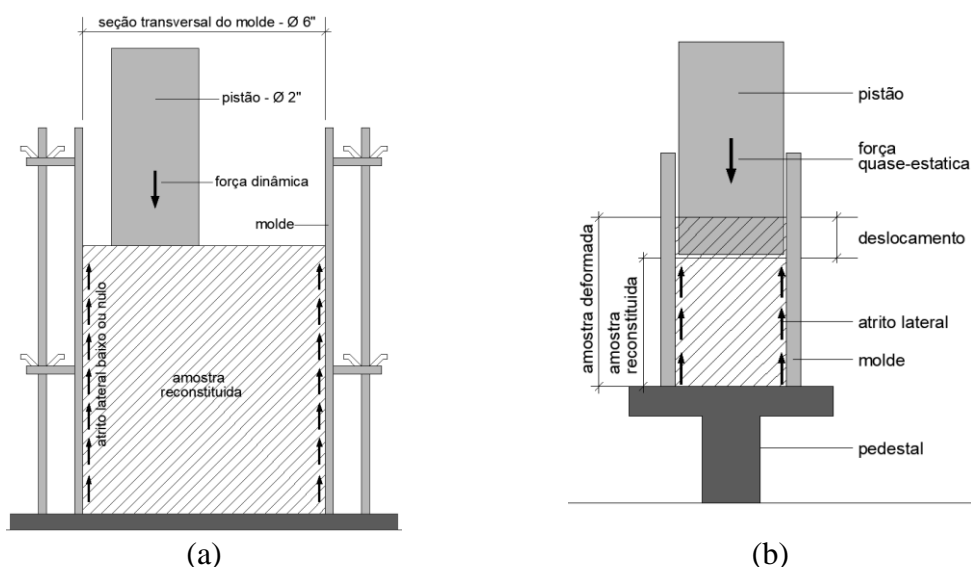


Figura 1. Comparação dos aparatos de compactação Proctor e quase-estática: a) molde e pistão utilizados na compactação proctor; b) molde e pistão utilizados na compactação quase-estática.

O ensaio quase-estático permite o controle dos índices físicos e da energia de compactação que podem ser obtidos a qualquer instante durante o procedimento. Porosidade, peso específico e grau de saturação de interesses são obtidos de maneira muito eficaz tornando o processo com alto grau de repetibilidade, resultando em procedimento muito recomendado para reconstituição de amostras a serem utilizadas nos mais diversos tipos de experimentos.

A energia mobilizada durante a reconstituição do solo possui comportamento exponencial, assim, o acréscimo de energia não é proporcional ao acréscimo da densidade. Cada vez mais quantidade de energia é necessária para produzir mesmo acréscimo de densidade. A hipótese deste comportamento é sustentada pela mobilização de atrito que é mais evidente em duas situações específicas: camadas espessas e altas densidades. Portanto, estudar as variáveis envolvidas é fundamental para entendimento do processo como um todo.

As principais variáveis no processo de reconstituição de amostras por meio da compactação quase-estática são: velocidade de compactação, energia total e elástica, espessura da camada compactada, umidade de preparação da amostra. Essas variáveis não são mencionadas na maioria dos estudos que utilizaram o procedimento quase-estático para reconstituição de amostras. A velocidade de compactação é a única variável informada por alguns autores. No entanto, não há recomendações do valor apropriado a ser utilizado (Zhemchuzhnikov et al., 2015). Exemplos de valores de velocidades utilizadas podem ser

encontrados em Bell (1977), Crispim et al. (2011), Kenai et al. (2006), Reddy and Jagadish (1993) e Zhang et al. (2005) com valores de 1.25 mm/min a 13 mm/min.

Modelagem Da Compactação

Variáveis da compactação quase-estática

A compactação quase-estática usando um molde de parede rígido e deslocamento unidimensional pode ser analisada em termos de algumas variáveis de volume-massa e energia. A massa do solo ocupa um volume dado pela área horizontal do molde e pela altura variável ocupada pela massa do solo, h .

Força vertical, tensão vertical, energia de compactação e densidade de energia são variáveis externas de interesse quando se trata de avaliar o trabalho de compactação realizado por forças externas e variáveis associadas. A força vertical pode ser medida diretamente durante a compactação sob uma taxa constante e controlada de deslocamento. A tensão vertical é trivialmente obtida desde que a amostra tenha área constante de seção transversal.

Considerando que somente deslocamentos verticais são produzidos pela aplicação de carregamento vertical, a energia de compactação pode ser obtida como mostrado:

$$E = \int_h^{h_i} F_v dh \quad (1)$$

em que: h e h_i são as alturas da amostra a qualquer momento e no início do processo, respectivamente, e F_v é a força vertical.

A densidade de energia, U , pode ser definida como a quantidade de energia por unidade de volume:

$$U = \frac{E}{Ah} \quad (2)$$

em que: A é a área horizontal constante da amostra.

É interessante notar que essas variáveis são relacionáveis apenas com o trabalho devido a forças externas. A maneira em que o trabalho externo é transformado em alterações no estado do solo, arranjo e compressão dos poros exigiria um exame mais detalhado de outras variáveis, como poro pressão de água e poro pressão de ar, apenas para exemplificar. Uma abordagem em como o trabalho externo é transformado em trabalho de compactação eficaz será proposta posteriormente.

Modelo para curvas de compressão

A relação entre a altura da amostra e a força aplicada obtida durante a compactação mostra comportamento exponencial (Islam & Kodikara, 2015). Portanto, a seguinte equação empírica foi proposta para modelar o processo de compactação.

$$F_v = \exp\left(-\frac{h_0 - h}{\lambda}\right) \quad (3)$$

em que: λ e h_0 são parâmetros de ajuste. Os parâmetros de ajuste têm significados claros, com a inclinação constante em função do carregamento vertical sendo $\lambda = \Delta h / \ln(F_v)$ e $h = h_0$ correspondendo a $F_v = 1$.

A Equação 5 pode ser usada para ajustar os dados experimentais. Embora a equação seja indefinida em $F_v = 0$, este comportamento não representa uma limitação significativa. A equação de ajuste proposta resulta em uma superestimação significativa da força de compactação durante o início do processo de compactação, mas excelente concordância é obtida em estágios posteriores. A porção inicial da curva de carga é altamente variável, sendo

afetada pela menor variação na maneira como a amostra de solo é inicialmente colocada. Portanto, parece apropriado desconsiderar a compactação inicial.

A carga vertical de compactação pode depender de inúmeras variáveis além do comportamento do solo e do estado inicial. Pode-se argumentar que a energia e a densidade de energia seriam variáveis de estado mais adequadas para estudar e comparar as condições de compactação. Considerando a função de carga vertical proposta, a energia de compactação pode ser relacionada à altura da amostra como segue:

$$E = \int_h^{h_0} \exp\left(-\frac{h_0-h}{\lambda}\right) dh \quad (4)$$

É importante notar que os limites médios da integral proposta da energia aplicada ao sistema até $F_v = 1$ foi negligenciada. Considerando que Newton está sendo usado como unidade de força vertical, cargas de até 1 N podem ser consideradas significativamente baixas para moldes de áreas horizontais típicas.

Resolvendo a integral de definição da energia de compactação, a equação resultante é a seguinte:

$$E = \lambda \left[1 - \exp\left(-\frac{h_0-h}{\lambda}\right) \right] \quad (5)$$

Por outro lado, a altura da amostra é obtida em função da energia de compactação de acordo com a seguinte equação:

$$h = h_0 + \lambda \ln\left(1 - \frac{E}{\lambda}\right) \quad (6)$$

A massa específica seca pode ser calculada combinando as relações básicas de massa-volume e a Equação 8 relacionando a altura da amostra e a energia de compactação:

$$e = \frac{\gamma_s(1+w)A}{Mg} \left[h_0 + \lambda \ln\left(1 - \frac{UAh}{\lambda}\right) \right] - 1 \quad (7)$$

$$\gamma_d = \frac{Mg}{A(1+w)} \frac{1}{h_0 + \lambda \ln\left(1 - \frac{UAh}{\lambda}\right)} \quad (8)$$

$$S = wG_s \frac{Mg}{\gamma_s(1+w)A \left[h_0 + \lambda \ln\left(1 - \frac{E}{\lambda}\right) \right] - Mg} \quad (9)$$

Componentes da energia de compactação

Quatro componentes de energia podem ser definidos no processo de compactação quase-estática, sendo: energia mobilizada, energia elástica, energia de acomodação e energia efetiva. A energia mobilizada é definida pelo trabalho gerado pela força vertical externa e o deslocamento gerado, previamente definido (Equação 3) como energia de compactação. A energia elástica é a energia que está relacionada com a deformação recuperável do solo. No processo de carregamento, descarregamento e recarregamento observa-se que o solo recupera parte da deformação e a energia necessária para alcançar a deformação de parada antes do descarregamento é definida como energia elástica (Figura 2).

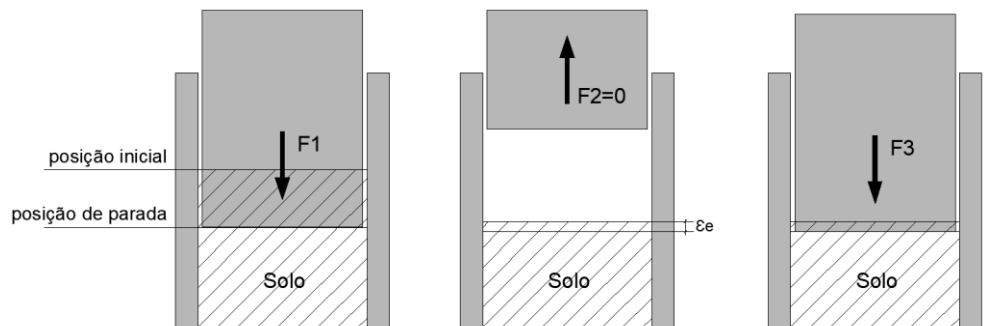


Figura 2. Conceito de energia elástica: ϵ_e – deformação elástica; F1 – força de parada; F2 – força durante o descarregamento; F3 – força necessária (força elástica) para alcançar a posição de parada em F1.

A energia elástica pode ser calculada pela Equação 3, sendo h_i a altura do solo incluindo a deformação recuperável e h a altura do solo na posição de parada do carregamento que antecedeu o descarregamento.

A energia de acomodação é obtida pela parada do pistão em qualquer posição. A força no momento de parada é reduzida pelo processo de adaptação da estrutura do solo. O equilíbrio é considerado quando grande quantidade de tempo é necessário para pequena redução da força.

A energia efetiva é calculada com a diferença entre a energia de compactação e as energias de acomodação e elástica. Quanto maior o número de paradas e recarga durante o teste, melhor será a curva de energia real. É importante ressaltar que, neste caso, considera-se que a acomodação e as energias elásticas não geram deformações no solo, portanto devem ser subtraídas da energia de compactação para obtenção da energia efetiva. A Figura 3 apresenta os conceitos dos tipos de energias em um único gráfico.

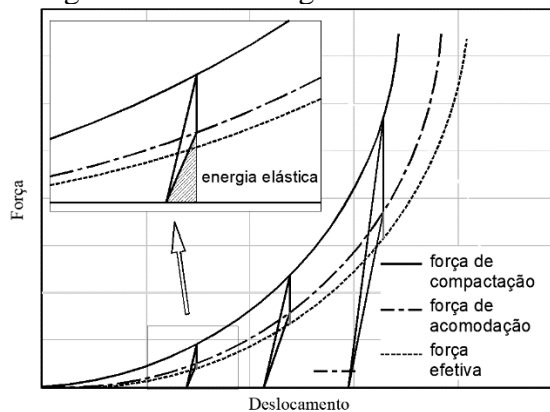


Figura. 3 Comportamento da curva Força x Deslocamento e obtenção da energia elástica.

MATERIAL E MÉTODOS

Características do solo

O solo utilizado neste estudo foi coletado na região sudoeste (16°43'S, 49°17'W) da Cidade de Goiânia estado de Goiás, Brasil. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho com perfil homogêneo e profundo. A coleta foi realizada no horizonte B latossólico 1m de profundidade. As características físicas são: LL=33,2%; LP = 22%; IP=11,2%; Gs = 2.69; areia = 25%; silte= 33%; argila = 42%; classificação unificada – CL.

A análise granulométrica foi realizada por peneiramento, sedimentação e difração laser. Para verificação do grau de agregação das partículas, realizou-se a sedimentação com água

destilada e com hexametáfosfato de sódio como agente desagregante. Esse agente desagregante também foi utilizado no ensaio de difração laser, além da ferramenta de ultrassom disponível no equipamento que também possui finalidade de desagregação. A diferença entre as porcentagens da fração fina mostra que o solo possui partículas que formam agregados muito resistentes. Isso pode ser comprovado pela comparação dos resultados do ensaio sem o agente desagregante, no qual a quantidade de argila foi de 2%, em comparação com o resultado do ensaio com a desagregação química e física, no qual a quantidade de argila passou para 40%. Esse efeito é muito comum em solos tropicais com alto grau de intemperismo, como é o caso do solo deste estudo.

Compactação e sistema de aquisição de dados

O carregamento quase-estático foi realizado por meio de uma prensa microprocessada da marca EMIC modelo DL2000 com capacidade de 20 kN e velocidade ajustável de 0.0001 mm/min a 50 mm/min. O equipamento possui datalogger integrado com aquisição de força e deslocamento, essas informações são armazenadas e disponibilizadas em planilha eletrônica, ASCII ou arquivo de texto. O ensaio pode ser comandado diretamente no equipamento, de maneira limitada, ou por meio de software. No software o ensaio deve ser escrito em um editor de algoritmos permitindo que ensaios complexos, como os ensaios cíclicos com condicionantes, possam ser totalmente automatizados.

Foi utilizado um molde metálico tripartido com dimensões de 36mm de diâmetro e 80mm de altura. O molde possui paredes espessas e alta rigidez. Nos ensaios de baixa velocidade com carregamentos cíclicos (duração de cerca de 10 h) foi utilizada proteção com algodão úmido e filme plástico para evitar perda de umidade da amostra.

Ensaio realizados

A quantidade de variáveis estudadas neste trabalho demandou um extenso programa experimental e um rigoroso planejamento para priorizar combinações lógicas entre elas. Para realização do ensaio estabeleceu-se, entre as combinações das variáveis, variável fixa (secundária) e variações na variável principal (Tabela 1). A alternância entre variável fixa e variável principal permitiu analisar todas as combinações planejadas e as influências de cada uma no processo como um todo.

Tabela 1. Combinação entre as variáveis analisadas.

Variável principal	Variáveis secundárias
Altura da camada (0.5, 1.0, 2.0, 3.0 e 4.0 cm)	Velocidade 1mm/min Umidade 18%
Velocidade (0.01, 0.1, 1.0, 10.0mm/min)	Altura da camada 1cm Umidade 18%
Umidade (16, 18, 20, 22, 24 e 26%)	Altura da camada 1cm Velocidade 1mm/min
Energia (mobilizada, acomodação, elástica e efetiva)	Altura da camada 1cm Velocidade 1mm/min

A escolha das umidades se baseou na curva de compactação proctor convencional a qual resultou em umidade ótima de 20% e peso específico seco máximo de 15.96 kN/m³. As velocidades foram escolhidas com variação na ordem de 10 vezes para tentar evidenciar com clareza sua influência no processo de compactação estática. A altura da camada foi limitada em 4cm devido ao diâmetro de 3.8cm do molde utilizado. Para esse diâmetro a altura limite já poderia comprometer a homogeneidade da reconstituição do CP e além de necessitar de grande quantidade de energia devido ao elevado atrito mobilizado.

Para avaliação das energias o ensaio foi realizado de maneira direta e cíclico. No ensaio cíclico definiu-se 10 paradas, com intervalos de 1mm de deslocamento cada, nas quais o pistão permaneceu estacionado por cerca de 10 min para atingir o equilíbrio da tensão que começa a reduzir no momento da parada. Atingido o critério de equilíbrio, o pistão é deslocado no sentido de alívio da pressão com velocidade suficiente para monitoramento da redução da força. Em seguida, atingindo força igual a zero, inicia-se novamente o processo de compactação quase-estática, com a velocidade inicialmente programada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Altura da camada compactada

Para escolha da altura da camada a ser compactada no processo quase-estático de reconstituição de amostras deve-se observar três critérios: a quantidade de energia mobilizada para alcançar os índices físicos a serem reconstituídos, pois o atrito lateral solo/molde aumenta na medida que a altura da camada é aumentada; e a homogeneidade da camada que devido a limitação de escorregamento das partículas sob pressão quase estática, podem ser geradas concentrações de tensão e, portanto, regiões de diferentes densidades na amostra (Yaghoubi et al., 2017). Neste sentido, a avaliação da altura da camada em termos de energia de compactação mobilizada, realizada neste trabalho, mostrou razoável sensibilidade, como mostrado na Figura 4. Para o índice de vazios de 0.7, por exemplo, a energia total mobilizada variou de 15 a 60 kJ/m³ para as camadas de 0.5 a 4.0 cm de espessura respectivamente. A influência do atrito na energia mobilizada no ensaio de compactação quase-estática já foi alvo de observação de outros autores (Zhemchuzhnikov et al., 2015).

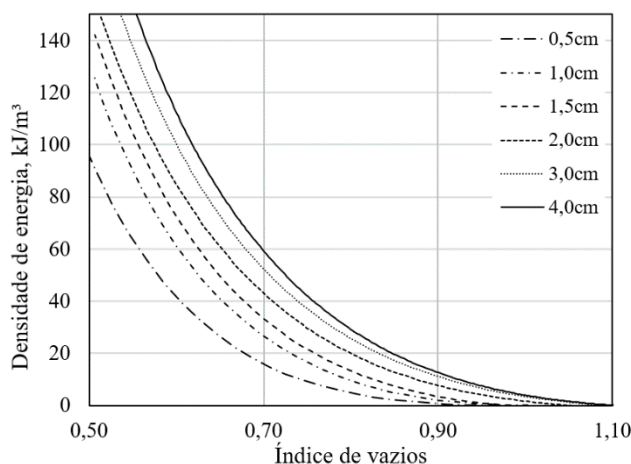


Figura 4. Energia de compactação mobilizada por unidade de volume para diferentes espessuras de camadas. O solo utilizado foi preparado com umidade de 18%.

Crispim et al. (2011) realizaram estudos de reconstituição de solos sem controle da energia mobilizada, considerando que o produto, peso específico seco, índice de vazios e porosidade, é obtido por meio da quantidade de solo e do volume final da amostra que é dependente unicamente do deslocamento do pistão. No entanto, a verificação da energia é recomendada, pois grande mobilização de energia pode ser também um indicativo de grande perda por atrito e, por consequência, falta de homogeneidade da distribuição dos poros da amostra reconstituída.

Dentre as alturas analisadas a e 0,5 cm foi a de maior dificuldade em termos de repetibilidade e de resultados lógicos. A grande variabilidade observada nos resultados dessa altura de camada está atribuída a pequena quantidade de solo necessário para realização do

ensaio. Assim, qualquer perda durante o procedimento gera grande influência no resultado, no caso de camadas com maiores espessuras essas perdas não são tão impactantes. Ressalta-se que pequenas perdas são inevitáveis, pois é comum pequena quantidade de solo aderir nas paredes do molde, na área de contato do pistão, ou até mesmo nos utensílios utilizados para inserção do solo no molde. Portanto, a escolha da altura da camada deve considerar também essa dificuldade metodológica. Na Tabela 2 pode ser observado o desvio padrão e coeficiente de variação dos índices de vazios para cada altura de camada. Essas análises foram obtidas considerando cinco repetições.

Outro aspecto que deve ser considerado é o diâmetro do molde ou da amostra a ser reconstituída na relação altura da camada e diâmetro para evitar grandes mobilizações de atrito entre o solo e o molde (Tien et al., 2004), relações próximas de um minimizam o efeito do atrito. As alturas avaliadas neste estudo se referem ao molde utilizado que possui 38 mm de diâmetro. Porém, é provável que comportamento semelhante seja verificado em moldes de outros diâmetros, mas com diferentes faixas de energia mobilizada.

Tabela 2. Análise da repetibilidade do índice de vazios para cada altura de camada analisada

Altura da camada (cm)	n ^o repetições	e	\bar{e}	σ	c.v. (%)
0,5	5	1,0	1,01	0,029	2,86
1,0	5	1,0	1,00	0,010	1,00
2,0	5	1,0	1,00	0,006	0,65
3,0	5	1,0	1,00	0,007	0,71
4,0	5	1,0	1,00	0,007	0,76

Velocidade de compactação

Na Figura 5 pode ser observado que a velocidade não gera grande influência na mobilização de energia no processo de compactação quase-estática. Porém, durante a realização dos ensaios verificou-se que a utilização de velocidades acima de 5 mm/min dificulta a parada do pistão na altura necessária para se obter índices físicos de interesse, essa falta de precisão na parada pode ocorrer mesmo em prensas programáveis. Outro aspecto relevante é a possibilidade de geração de poro pressões de água. Por esse motivo, recomenda-se a verificação da velocidade a ser utilizada para amostras reconstituídas em baixos valores de índice de vazios e solos de granulometria fina (Zhemchuzhnikov et al., 2015).

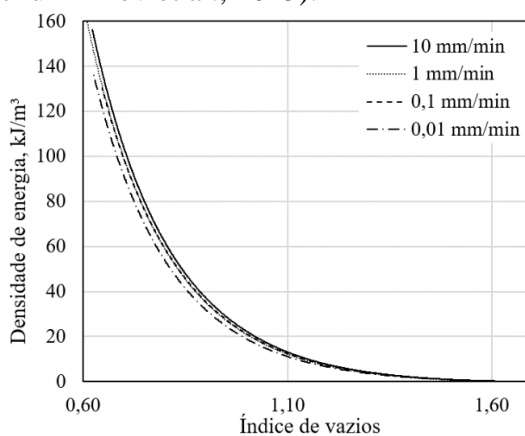


Figura 5. Efeito da velocidade na energia de compactação. O solo utilizado foi preparado com umidade de 18%.

Velocidades inferiores a 0.5 mm/min também precisam ser utilizadas com cuidado, pois apesar de velocidades reduzidas serem recomendadas, para que não sejam geradas poro pressões de água, o tempo de duração do ensaio deve ser considerado para evitar perda de água em ensaios muito prolongados, uma vez que o teor de água pode gerar grande influência no arranjo das partículas e, portanto, deve-se tentar mantê-lo constante durante a realização do procedimento. Neste estudo, verificou-se que a velocidade de 1 mm/min atendeu aos critérios mencionados, não sendo necessário a proteção de perda de umidade que se manteve constante durante todo procedimento além de tornar a parada do pistão muito precisa resultando em alta repetibilidade no índice de vazios desejado.

Umidade de compactação

Foram avaliadas seis umidades com velocidade de carregamento de 1 mm/min. O resultado, apresentado na Figura 6a, mostra que o conteúdo de água no solo, assim como na compactação dinâmica (Hanson & Robinson, 1993), gera influência no processo de compactação quase-estática. Observa-se, na Figura 6b, que para obtenção de índices de vazios menores o aumento do teor de água reduz consideravelmente a energia necessária. No entanto, nos índices de vazios de 0.9 e 1.0 a influência da umidade na redução da energia total de compactação é muito menor. Esse resultado confirma a importância da presença de água na lubrificação das partículas facilitando o movimento durante a compactação. Na compactação dinâmica essa quantidade de água favorece a compactação até o limite da umidade ótima, a partir deste valor, a água ocupa espaço que poderia ser ocupado por partículas sólidas reduzindo a densidade do solo. Entretanto, na compactação quase-estática, como não há perda de energia geralmente o pico de umidade ótima não é evidente.

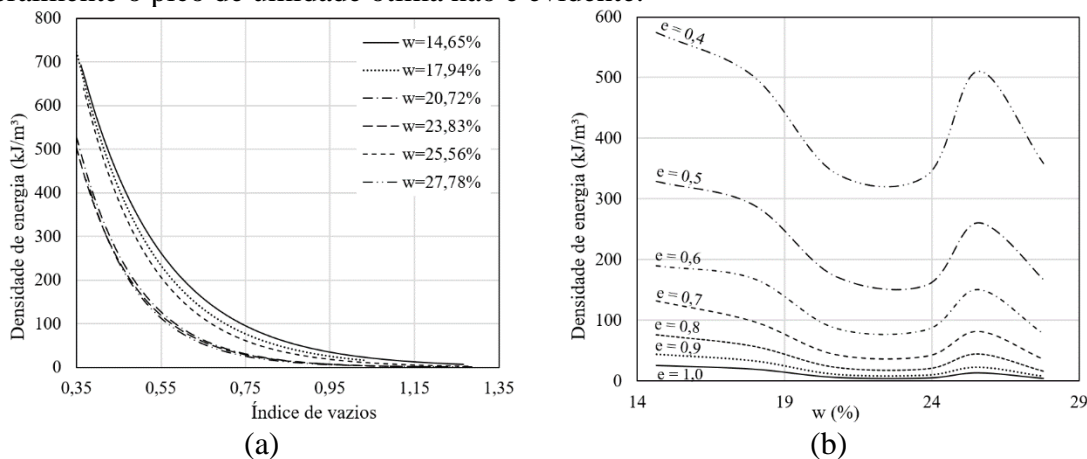


Figura 6. Efeito da velocidade na energia de compactação.

Energia de compactação

A energia total de compactação mobilizada no processo é a soma de três componentes: energia elástica; energia de acomodação e energia efetiva. Essas energias podem ser medidas em ciclos de carregamento, parada para equilíbrio da tensão, descarregamento e recarregamento. Ramavath et al. (2015) realizaram ciclos de carregamento e descarregamento em compactação quase-estática e sugeriram a separação da energia elástica da energia total para cálculo da energia efetiva e Tien et al., (2004) também realizaram carregamentos cíclicos para estudar o comportamento elástico do material. Porém, neste estudo, percebeu-se que um terceiro componente da energia mobilizada também deve ser avaliado com igual importância. Essa terceira parcela foi chamada de energia de acomodação e pode ser obtida com a parada do pistão antes de realizar a descompressão nos ciclos de carregamento e recarregamento. Quando o movimento do pistão é interrompido e mantido estaticamente parado, observa-se que se inicia

uma redução da força aplicada, essa redução tende a se estabilizar, mas a estabilização acontece com considerável redução da força aplicada.

O cálculo da energia para cada uma das parcelas é feito utilizando-se integração da curva Força X Deslocamento para todos os casos, conforme equação 3 já apresentada. Os índices físicos também podem ser calculados para cada uma das parcelas em qualquer instante. A Figura 7 apresenta os resultados das curvas de energia pelo índice de vazios para cada umidade avaliada. Em todos os casos, de umidade de preparação, a energia de acomodação gerou considerável redução da energia total mobilizada. Por outro lado, a energia elástica contribuiu para perda de energia a partir da energia total mobilizada de 50 kJ/m³. Portanto, fica evidente que para cálculo da energia efetiva a energia de acomodação não deve ser negligenciada.

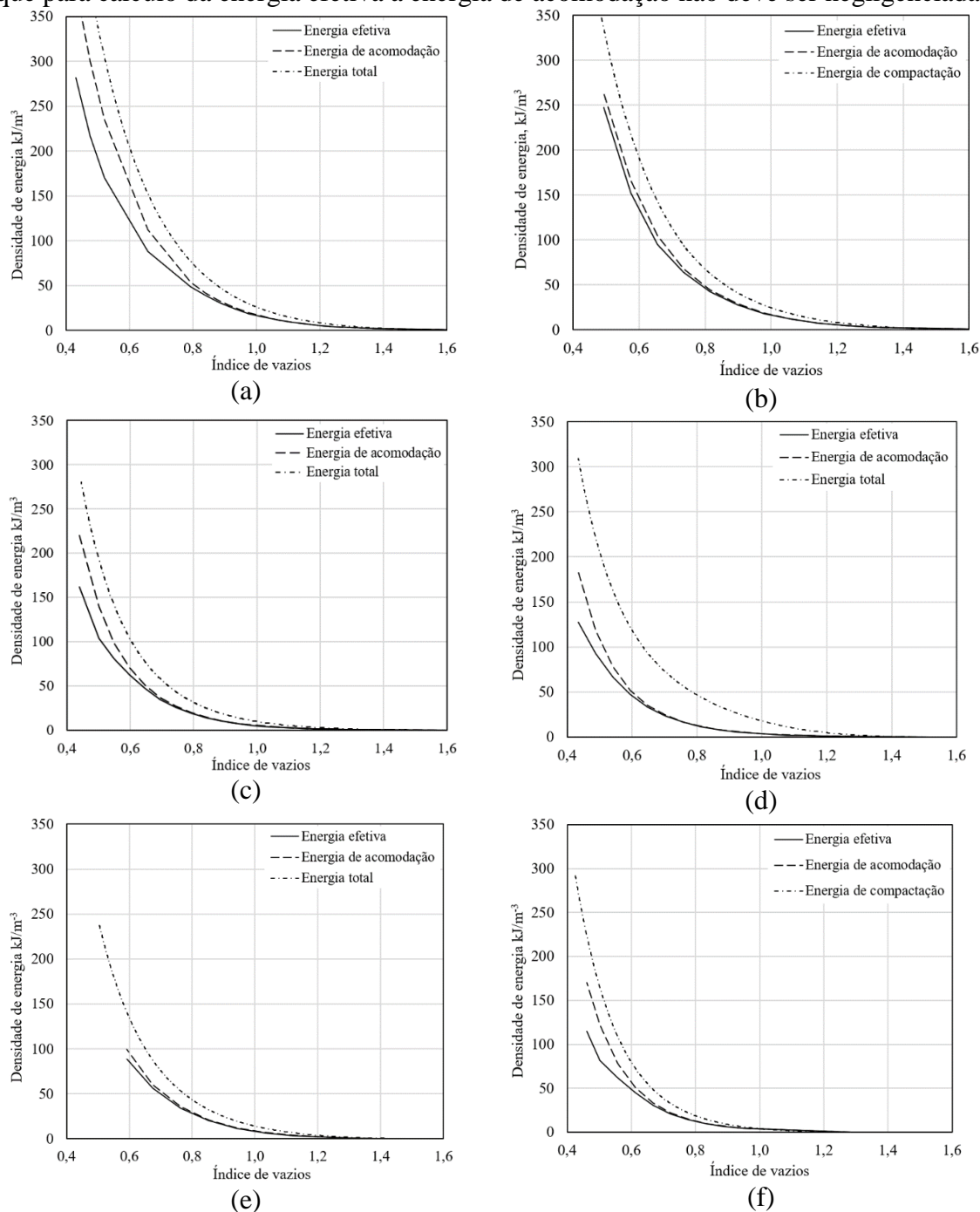


Figura 7. Componentes de energia para as umidades avaliadas: a) 14,65%; b) 18,00%; c) 20,72%; d) 23,83%; e) 26,00%; f) 27,78%.

Curva densidade seca x umidade

Um dos grandes objetivos da compactação em laboratório, além da reconstituição dos solos, é a obtenção do peso específico seco máximo e da umidade ótima. Esses dados são obtidos por meio da curva de compactação, que relaciona o peso específico seco e a umidade. Na compactação Proctor essas curvas podem ser obtidas para três diferentes energias, normal, intermediária ou modificada. Neste trabalho realizou-se a comparação entre a curva de compactação proctor, com energia normal, e as curvas de compactação quase-estática em várias energias. Na Figura 8 são apresentados os resultados das curvas de compactação obtidas para as energias total, acomodação e efetiva nos valores de 50 e 100 kJ/m³. As curvas possuem uma leve tendência ao formato da curva padrão Proctor, mas em nenhuma das energias é possível estabelecer essa relação. O pico da umidade ótima e densidade seca máxima, muito evidente na curva padrão Proctor, geralmente não aparece nas curvas de compactação quase estática. Esse mesmo comportamento já foi observado por outros autores (Mesbah, A. et al., 1999; Reddy & Jagadish, 1993; Tarantino & De Col, 2008; Zhang et al., 2005; Caicedo et al., 2014; Zhemchuzhnikov et al., 2015).

O motivo do pico, muito evidente na compactação Proctor, que separa os ramos seco e úmido, é a perda de energia facilmente observável a medida em que o solo deixa o ramo seco e passa para o ramo úmido. No início da curva, o aumento de umidade lubrifica as partículas e melhora o rearranjo, tornando a energia cada vez mais eficiente para aumento da densidade seca. No entanto, a partir da umidade ótima, a quantidade de água adicional além de lubrificar em excesso o contato entre as partículas, o que ocasiona grande perda de energia devido a seção reduzida do pistão em relação a seção do molde, o que gera grande deslocamento de solo no contato do pistão com o solo, começa a tomar lugar das partículas no molde. Assim, como a água possui densidade menor do que as partículas, o peso específico seco é reduzido, uma vez que a quantidade de solo seco é reduzida.

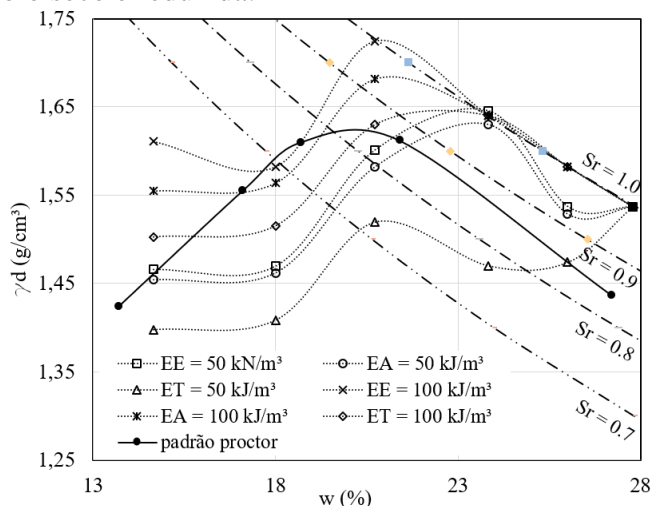


Figura 8. EE – Energia efetiva; EA – energia de acomodação; ET – energia total

Na compactação quase-estática, mesmo com bastante umidade, não há perda substancial de energia, pois o pistão possui a mesma seção do molde, assim não é gerado deslocamento de solo nas proximidades do pistão que ocasiona perda da eficiência de energia. Neste processo acontece exatamente o contrário, com as partículas lubrificadas em excesso a energia no ramo úmido se torna ainda mais eficiente, pois com a redução do atrito entre partículas a resistência ao deslocamento é reduzida. Esse efeito gera densidades cada vez maiores, como pode ser observado na curva de compactação proveniente do processo de compactação quase-estática (Figura 8). Portanto, a comparação entre os métodos não deve ser feita considerando que o Proctor é realizado sem perda de energia.

Para que a comparação seja possível as mesmas condições devem ser consideradas. Assim, como é muito difícil a estimativa da perda de energia que ocorre no procedimento de compactação proctor, a comparação não deve ser realizada por meio de mesmas energias a qual tem sido a tentativa dos estudos. Uma análise nos índices físicos provenientes da compactação quase-estática torna-se fundamental para determinação de novos parâmetros a serem unificados para comparação. Exemplifica-se, nesta análise, os índices físicos provenientes da energia de compactação de 50 kJ/m³ que foi objeto de comparação com a compactação proctor (Tabela 3).

Tabela 3. Análise da repetibilidade do índice de vazios para cada altura de camada analisada

W (%)	Diâmetro do cilindro (cm)	h final da camada (cm)	V final da camada (cm ³)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	g _n (g/cm ³)	g _d (g/cm ³)
14,65	3,80	1,04	11,794	19,295	16,829	1,636	1,427
17,94	3,80	1,12	12,701	19,662	16,671	1,734	1,470
20,72	3,80	1,04	11,794	22,727	18,826	1,927	1,596
23,83	3,80	0,94	10,660	21,256	17,165	1,994	1,610
25,56	3,80	0,98	11,114	21,039	16,676	1,893	1,508
27,78	3,80	0,90	10,207	21,210	16,599	2,078	1,626

Observa-se na Tabela 3 que mesmo com a redução da quantidade de solo seco, o peso específico seco aumenta, isso porque a altura final da camada também é reduzida compensando a redução do solo. Ressalta-se, porém, que na compactação proctor o volume sempre é o mesmo, pois no procedimento é adicionado solo até completar totalmente o volume do cilindro padronizado. Assim, parece ser ideal a comparação mantendo volume constante na compactação quase-estática negligenciando-se a energia resultante, assim como acontece na compactação proctor. Na Figura 9 é apresentado a comparação dos dois processos de compactação considerando volume constante. Nota-se boa proximidade da umidade ótima, densidade seca máxima e da curva de compactação. É importante ressaltar que essa é a comparação que deve ser feita entre os dois procedimentos. Os resultados mostram que a compactação quase-estática pode ser perfeitamente utilizada para obtenção dos parâmetros da curva de compactação.

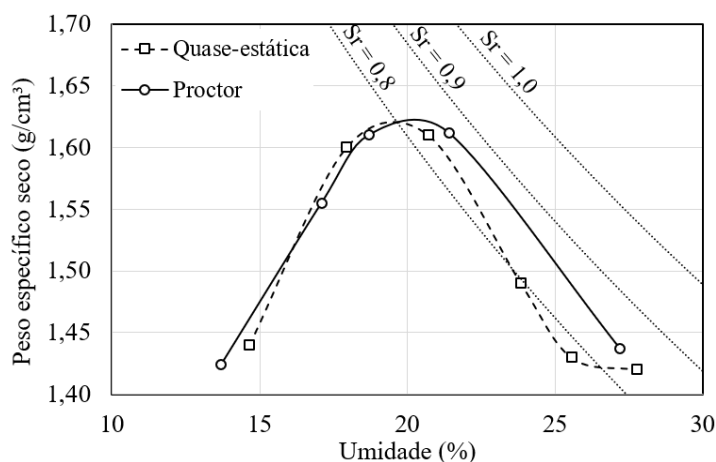


Figura 9. Curva de compactação proctor e quase-estática considerando volume constante.

Aplicação dos modelos

O modelo proposto se ajustou as curvas típicas de força x deslocamento com valor de R^2 superior a 0,99 para todos os casos. Na Figura 10a pode ser observado o ajuste da curva força x deslocamento para o ensaio com 18% de umidade e espessura de 1 cm. A energia pode ser obtida pela integral da curva força x deslocamento dos dados experimentais ou dos dados ajustados e dividida pelo volume da amostra para obtenção da densidade de energia. Na Figura 10b é feita a comparação dos dois métodos. É sugerido que a apresentação da curva de densidade de energia seja em função de um índice físico normalizado, tais como: índice de vazios, grau de saturação, peso específico seco dentre outros. Na Figura 10c é apresentada a densidade de energia na escala logarítmica com o índice de vazios e na Figura 10d com o grau de saturação.

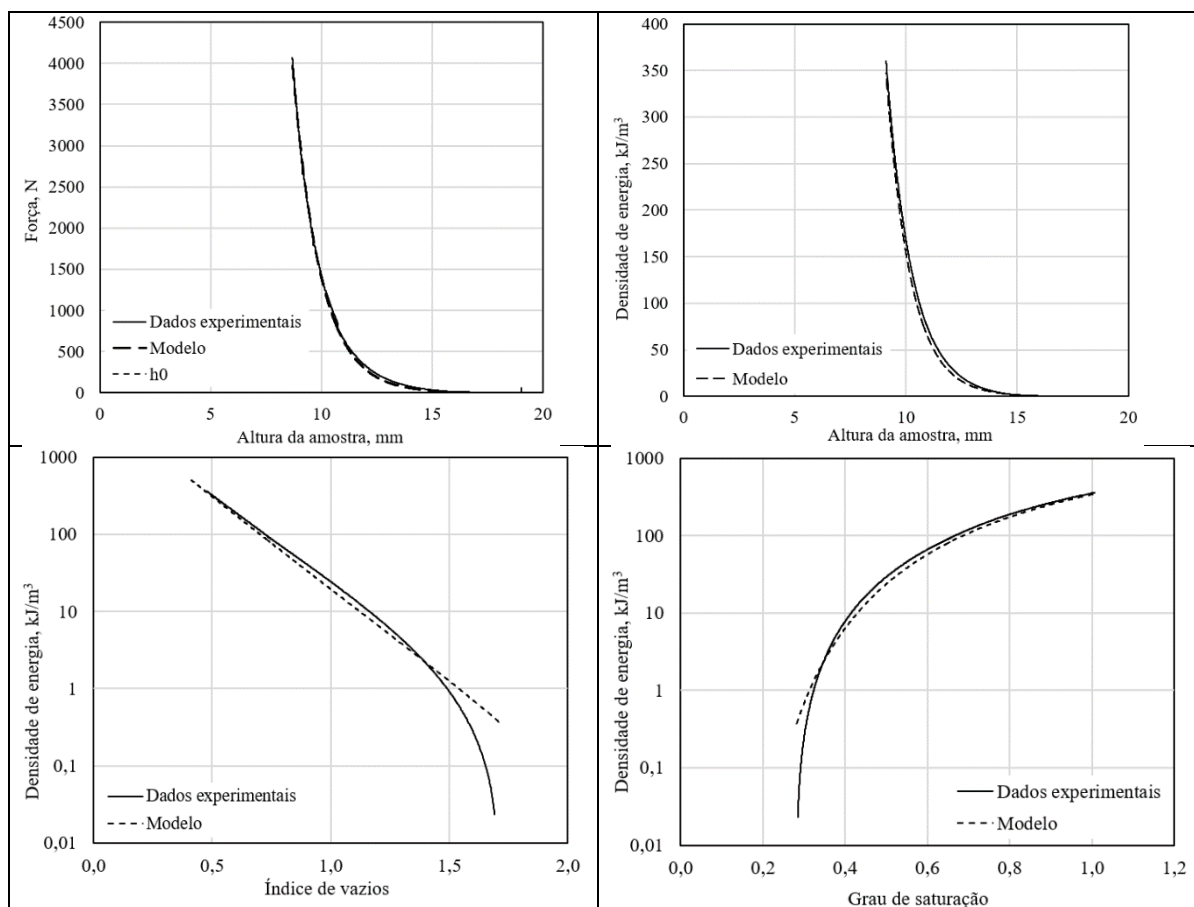


Figura 10. Curva força x deslocamento dos dados experimentais e do modelo de ajuste para solo preparado com 18% de umidade e 1cm de altura de camada.

Quando a densidade de energia é apresentada na escala logarítmica (Figura 10b e 10c), percebe-se que o modelo não se ajusta bem aos dados iniciais de índice de vazios (início da compactação). Esse efeito é esperado, pois se trata do início do processo de compactação no qual o índice de vazios possui valores máximos. Nessa etapa inicial não há um comportamento definido e depende da maneira em que o solo solto é inserido no molde metálico. A partir de cerca de 25% de deformação axial o comportamento passa a ser típico e o modelo se ajusta aos dados experimentais com boa precisão. Esse efeito é minimizado quando a densidade de energia é carregada em função do grau de saturação, como apresentado na Figura 3.12 d.

CONCLUSÃO

O modelo apresentado para a compactação estática se ajustou aos dados experimentais com coeficiente de determinação de 0,99 para todos os casos. O modelo permite a obtenção de índices físicos a qualquer instante do procedimento, assim, sugere-se que a compactação, por esse processo, seja realizada em amplitudes de energia e índices de vazios superiores aos necessários para que os dados possam ser aproveitados para outras finalidades.

A comparação da curva de compactação entre os métodos por meio de mesma densidade de energia, como tradicionalmente é feito, mostrou que não é possível a obtenção do peso específico seco máximo e umidade ótima devido a ausência do ramo úmido. No entanto, a nova proposta de comparação padronizando-se o volume da amostra na compactação quase-estática, assim como é feito na compactação proctor, mostrou bons resultados e parece promissora.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, E.E.; GENS, A.; GÓMEZ-ESPINA, R.; LLORET MORANCHO, A.; GENS SOLÉ, A.; **Unsaturated soils proceedings of the Fifth International Conference on Unsaturated Soils**, Barcelona, Spain, 6-8 September 2010, Fifth International Conference on Unsaturated Soils. 2011.
- ASSOULINE, S.; TESSIER, D.; TAVARES-Filho, J.; **Effect of Compaction on Soil Physical and Hydraulic Properties: Experimental Results and Modeling**. Soil Sci. Soc. Am. J. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100020005x>. 1997.
- BELL, J.R. **Compaction energy relationships of cohesive soils**. Transp. Res. Rec. 29–34. 1977.
- CAICEDO, B.; TRISTANCHO, J.; THOREL, L.; LEROUEIL, S.; **Experimental and analytical framework for modelling soil compaction**. Eng. Geol. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.014>. 2014.
- CRISPIM, F.A.; LIMA, D.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SILVA, C.H. de C.; Carvalho, C.A.B.; BARBOSA, P.S. de A.; Brandão, E.H.; **The influence of laboratory compaction methods on soil structure: Mechanical and micromorphological analyses**. Soils and Rocks. 2011.
- DORIS ASMANI, M.Y.; HAFEZ, M.A.; NURBAYA, S.; **Static laboratory compaction method**. Electron. J. Geotech. Eng. 2011.
- DORIS ASMANI, M.Y.; HAFEZ, M.A.; SHAKRI, M.S. **Comparison between static and dynamic compaction for California Bearing Ratio (CBR)**. Electron. J. Geotech. Eng. 2013.
- EKWUE, E., I.; BIRCH, R.; CHEWITT, J. **Effect of dynamic and static methods of compaction on soil strength**. West Indian J. Eng. 37, 74–78. 2015.
- HAFEZ, M.A.; DORIS ASMANI, M.; NURBAYA, S.; **Comparison between static and dynamic laboratory compaction methods**. Electron. J. Geotech. Eng. <https://doi.org/10.22496/jeas.v1i1.111>. 2010.
- HANSON, G.J.; ROBINSON, K.M. **The influence of soil moisture and compaction on spillway erosion**. Am. Soc. Agric. Eng. 36, 1349–1352. 1993.
- HONG, Z.-S.; YIN, J.; CUI, Y.-J.; **Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents**. Géotechnique. <https://doi.org/10.1680/geot.09.P.059>. 2010.
- ISLAM, T., KODIKARA, J. **Interpretation of the loading–wetting behaviour of compacted soils within the “MPK” framework. Part I: Static compaction**. Can. Geotech. J. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0317>. 2015.
- KELL, T.R. **The influence of compaction method on fabric of compacted clay**. The University of Arizona. 1964.
- KENAI, S.; BAHAR, R.; BENAZZOUG, M.; **Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil**, in:

Journal of Materials Science. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0226-1>. 2006.

KURUCUK, N.; FREDLUND, D.; KODIKARA, J.; **Theoretical modelling of the compaction curve, in: Unsaturated Soils.** Advances in Geo-Engineering. <https://doi.org/10.1201/9780203884430.ch47>. 2008.

LIN, C.; HONG, Z.-S.; ZENG, L.-L.; CUI, Y.-J.; CAI, Y.-Q. **Compression behaviour of natural and reconstituted clays.** Géotechnique. <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.046>. 2012.

MESBAH, A.; MOREL, J. C.; OLIVIER, M., **Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents.** Mater. Struct. 32, 687–694. 1999.

OTÁLVARO, I.F.; NETO, M.P.C.; CAICEDO, B., **Compressibility and microstructure of compacted laterites.** Transp. Geotech. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.09.005>. 2015.

RAGHAVAN, G.S. V., OHU, J.O. **Prediction of static equivalent pressure of proctor compaction blows.** Am. Soc. Agric. Eng. 1398–1400. 1985.

RAMAVATH, P.; BISWAS, P.; SURESH BABU, P.; LAXMINARAYANA, P.; JOHNSON, R.; **Compaction curves: A tool for qualitative evaluation of quasi-static compaction behavior of ceramic powders.** J. Aust. Ceram. Soc. 2015.

REDDY, B.V.V.; JAGADISH, K.S. **The static compaction of soils.** Géotechnique 43, 337–341. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.2.337>. 1993.

SEED, H.B. **Stability and swell pressure characteristics of compacted clays,** in: Milligan, O.W. (Ed.), Clays and Clay Minerals. National Academy of Sciences, Washington, pp. 483–504. 1955.

SHARMA, B., SRIDHARAN, A., TALUKDAR, P., **Static method to determine compaction characteristics of fine-grained soils.** Geotech. Test. J. <https://doi.org/10.1520/GTJ20150221>. 2016.

TARANTINO, A., COL, E., **Compaction behaviour of clay.** Géotechnique. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.3.199>. 2008.

TIEN, Y.M., WU, P.L., CHUANG, W.S., WU, L.H., **Micromechanical model for compaction characteristics of bentonite-sand mixtures.** Appl. Clay Sci. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.12.020>. 2004.

YAGHOUBI, E., DISFANI, M.M., ARULRAJAH, A., KODIKARA, J., **Impact of compaction method on mechanical characteristics of unbound granular recycled materials.** Road Mater. Pavement Des. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1283354>. 2017.

ZHANG, Z., TAO, M., TUMAY, M.T., **Absorbed energy and compacted cohesive soil performance.** Geotech. Test. J. 2005.

ZHAO, X., ZHOU, G., TIAN, Q. **Study on the shear strength of deep reconstituted soils.** Min. Sci. Technol. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60076-4](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60076-4). 2009.

ZHEMCHUZHNIKOV, A., GHAVAMI, K., CASAGRANDE, M., **Static Compaction of Soils with Varying Clay Content.** Key Eng. Mater. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.238>. 2015.