



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

IMPACTO DE DIFERENTES METODOLOGIAS DE COMPACTAÇÃO EM DOIS SOLOS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Dêreck Hummel Becher¹; Mariana Fantinel Cirolini¹; Patricia Rodrigues Falcão¹; Paula Taiane Pascoal¹; Magnos Baroni¹ & Rinaldo José Barbosa Pinheiro¹

RESUMO

A compactação tem notória importância em obras de pavimentação viária, tal fato está vinculado à capacidade de garantir a estabilidade e durabilidade de suas camadas, tendo, assim, como garantia uma superfície resistente ao tráfego. Existe uma gama de métodos de compactação com diferentes fontes de energia, sendo que estes visam à reestruturação das partículas de solo, aumentando a sua densidade e reduzindo o índice de vazios. Destaca-se que a compactação objetiva melhorar as propriedades geotécnicas do material, entretanto, há uma série de fatores intervenientes que podem resultar na variabilidade dos resultados obtidos em um ensaio de compactação. O viés do presente artigo refere-se à comparação dos dados obtidos através das curvas de compactação realizadas nas energias normal e intermediária, utilizando as metodologias preconizadas pela ABNT (2016), DNIT (2018) e DNER (1994). Além disso, foram utilizados dois solos distintos, sendo um proveniente do município de Cruz Alta e outro de São Lourenço do Sul, ambos no estado do Rio Grande do Sul. Os resultados indicaram que a metodologia DNIT apresentou os maiores valores para o peso específico aparente seco máximo e os menores valores de umidade ótima quando comparados com as demais. Já a umidade ótima apresentou-se maior na metodologia do DNER (1994) e da ABNT (2016). Em outras palavras, cada metodologia resultou em um valor de umidade ótima distinto, entretanto em um projeto geotécnico a variabilidade da umidade assume um papel crucial, pois ela afeta a capacidade de suporte e a permeabilidade do material. Posto isso, reitera-se a importância do controle dessa variação em obras de infraestrutura viária visando garantir a segurança e a eficiência do pavimento.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação; ABNT; DNIT; DNER.

ABSTRACT

As a result of its ability to ensure the stability and durability of its layers, and, in turn, to ensure a surface that is resistant to traffic, compacting has a well-known importance in projects involving the installation of vehicular paving. There are a variety of methods for compacting using various energy sources, and these work to restructure the particles while increasing their density and lowering their void ratio. It is noteworthy that compaction aims to improve the geotechnical properties of the material, but there are several intervening factors that can result in variability in the results obtained in a compaction test. The focus of this article refers to the comparison of data obtained through compaction curves performed at normal and intermediate energies, using the methodologies recommended by ABNT (2016), DNIT (2018), and DNER (1994). In addition, two distinct soils were used, one from the municipality of Cruz Alta and another from São Lourenço do Sul, both in the state of Rio Grande do Sul. The results showed that the DNIT methodology presented the highest values for maximum dry bulk density and the lowest values of optimum moisture content compared to the others. On the other hand, the optimum moisture content was higher in the DNER (1994) and ABNT (2016) methodologies. In other words, each methodology resulted in a distinct value of optimum moisture content. However, in a geotechnical project, moisture variability plays a crucial role as it affects the bearing capacity and permeability of the material. Thus, it emphasizes the importance of controlling this variation in road infrastructure works to ensure safety and efficiency of the pavement.

KEY WORDS: Pavement; ABNT; DNIT; DNER.

¹ Universidade Federal de Santa Maria, dereckhbecher@gmail.com; marianafantinel@gmail.com; falcao.rodriques.patricia@gmail.com; paulatpascoal@gmail.com; magnos.baroni@gmail.com; rinaldo@ufsm.br



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

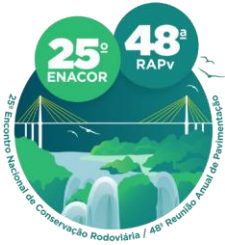
De maneira tradicional, os pavimentos viários são classificados entre rígidos e flexíveis. Nesse sentido, o primeiro se caracteriza por ter um revestimento com elevada rigidez, como o concreto de cimento Portland, em relação às demais camadas, distribuindo as cargas superficiais uniformemente de maneira a aliviar as tensões sofridas pelas camadas subjacentes. O pavimento flexível, por sua vez, não apresenta diferenças tão significativas de rigidez entre o seu revestimento, geralmente camada asfáltica, e as demais camadas inferiores, quando comparado aos pavimentos rígidos. Assim, as tensões são compartilhadas de maneira mais igualitária nas camadas, proporcionalmente às suas respectivas rigidezes (BERNUCCI *et al.*, 2022).

O dimensionamento de um pavimento viário deve levar em conta o local no qual será implementado, em função da ação climática atuante, além da conjuntura do carregamento de tráfego prevista. Um dimensionamento errôneo conduz a defeitos significativos no pavimento, sendo os mais comuns no tipo flexível a fadiga do revestimento asfáltico, e as deformações permanentes geradas em suas diferentes camadas (MEDINA, 2015). Nessa perspectiva, surge uma preocupação maior sobre a averiguação de todo o conjunto das camadas dos pavimentos flexíveis, desde o revestimento superficial até as camadas mais internas constituídas por materiais granulares e solos.

Um aspecto de importância indiscutível para a pavimentação está relacionado ao processo de compactação nas camadas de base, sub-base e subleito, que consiste na acomodação das partículas e na densificação do material de cada camada por equipamentos mecânicos, tendo como intuito aumentar sua resistência e sua rigidez, assim como diminuir a permeabilidade (CRISPIM *et al.*, 2011; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015). Buscando compreender o comportamento dos materiais em campo, realiza-se ensaios de compactação em laboratório. Nestes, é possível identificar e correlacionar teores de umidade do material com sua massa específica seca após compactação, identificando uma umidade específica (umidade ótima) que resulte no peso específico aparente seco máximo do material.

Os processos para a compactação de solos em laboratório, sendo este material comumente utilizado nas camadas de pavimentação, variam em diversos parâmetros, tais como a energia de compactação que será utilizada, as características dos cilindros empregados para a moldagem do corpo de prova, o soquete a ser utilizado, o número de camadas e o número de golpes dados em cada camada (CRISPIM *et al.*, 2011). É indiscutível a influência da umidade de compactação e da energia aplicada no valor obtido do peso específico aparente seco máximo. Ao aumentar a energia de compactação, observa-se um aumento do peso específico seco do material, enquanto a umidade ótima diminui. Nos casos em que o solo apresenta umidade abaixo da ótima, ao utilizar uma energia de compactação maior há um aumento de densidade seca. Já em momentos em que a umidade é maior que a ótima, um incremento na energia de compactação não provoca aumento da densidade, isso se devido à impossibilidade de eliminar o ar presentes nos vazios. Outra análise das curvas de compactação se dá nas curvas de saturação, isto é, a situação do solo na qual ocorre a expulsão total do ar, sendo os vazios preenchidos por água. Porém, não é possível expulsar todo o ar existente nos vazios durante a compactação, assim a curva de compactação do solo, em geral, não se iguala à curva de saturação de 100%.

No Brasil, existem diferentes entidades que padronizam os ensaios de compactação de solos em laboratório. A Associação Brasileira de Normas Técnicas tem metodologias descritas na NBR 7182 (ABNT, 2016), a qual regulamenta a aplicação das energias normal (EN), intermediária (EI) e



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



modificada (EM), permitindo o uso do cilindro metálico pequeno (Proctor) ou o cilindro metálico grande (cilindro de Índice de Suporte Califórnia - ISC).

Com o avanço dos métodos de dimensionamento e o estudo mais aprofundado sobre os materiais usados na pavimentação, iniciaram-se ensaios laboratoriais mais completos e específicos nessa área, a exemplo dos ensaios triaxiais de cargas repetidas para a obtenção dos parâmetros de módulo de resiliência e deformação permanente dos materiais. Os resultados desse ensaio proporcionam um dimensionamento mais acurado e aprofundado sobre os pavimentos, sendo possível prever as dimensões das camadas compactadas e quantificar seus respectivos defeitos futuros. A fim de normatizar as condições desses ensaios, a Rede Temática do Asfalto desenvolveu uma metodologia de ensaio de compactação que utiliza o cilindro tripartido, o Procedimento Rede 04 (PETROBRAS, 2010), em conjunto com resoluções descritas na normativa de ensaios de compactação DNIT 134 (DNIT, 2018). Ademais, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem apresenta uma metodologia de ensaio de compactação em equipamento miniatura (DNER 228/1994), essa normativa apresenta os procedimentos de compactação de solos empregando um volume reduzido de material e corpos de prova de 50 mm de diâmetro, por meio das EN e EI de compactação.

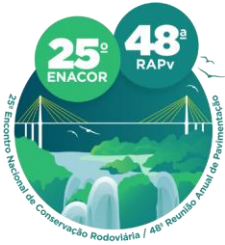
Zucchi *et al.* (2019) compararam os métodos de compactação da ABNT (2016) e REDE (2010) para solo argiloso e arenoso, constatando divergência nos resultados obtidos em cada método. Quando analisados os resultados dos ensaios de compactação de um solo argiloso com comportamento laterítico, obteve-se a mesma densidade máxima em ambos os métodos quando utilizada a energia normal. Em relação à energia intermediária, houve uma semelhança entre umidade e uma variação relativamente baixa na massa específica aparente seca máxima (MEAS). Já para um solo siltoso de comportamento não laterítico, foram apresentados resultados semelhantes na energia normal de compactação, entretanto, a energia intermediária de compactação resultou em divergências de comportamento. A MEAS obtida pelo molde tripartido foi menor do que a obtida pelo molde ISC, enquanto a umidade ótima no molde tripartido foi superior à metodologia ABNT (2016). Dessa maneira, os autores comentam que a metodologia escolhida deve ser utilizada durante todo o processo, não sendo aconselhável utilizar mais de uma metodologia em conjunto.

Diante do exposto, o presente trabalho possui como objetivo a comparação dos resultados obtidos por intermédio das curvas de compactação realizadas na energia normal e intermediária pelas metodologias preconizadas pela ABNT (2016), do DNIT (2018) e DNER (1994), confrontando-os com dados de controle de execução de campo, pois os dois materiais considerados nesta investigação, foram empregados em subleito de pavimentos no Rio Grande do Sul.

Outra incógnita avaliada refere-se ao tipo de solo, com isso os procedimentos supracitados foram realizados para um solo proveniente do município de Cruz Alta e outro de São Lourenço do Sul, ambos no estado do Rio Grande do Sul. Nesse sentido, ressalta-se a notória importância de investigar a existência de divergências ou similaridades entre os resultados obtidos em cada método, visando compreender a melhor metodologia a ser considerada no âmbito de solos empregados em estruturas de pavimentos, em consonância aos ensaios triaxiais de cargas repetidas, necessários para o dimensionamento mecanístico-empírico.

MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa teve por objetivos comparar diferentes ensaios de compactação para dois solos distintos, comparando os resultados pela tipologia do material e avaliando as metodologias propostas



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



pela NBR 7182 (ABNT, 2016), pela normativa do DNIT 134 (DNIT, 2018) em conjunto com o Procedimento REDE 04 (PETROBRAS, 2010), e pela norma DNER 228 (DNER, 1994), considerando as energias normal e intermediária. Para realizar este comparativo, foram utilizados dois solos com diferentes formações geológicas. Um foi coletado no município de Cruz Alta (denominado como CA), outro coletado no município de São Lourenço do Sul (denominado como SLS), ambos do estado do Rio Grande do Sul. A Tabela 1 demonstra a caracterização física e a classificação dos solos analisados, e a Figura 1 apresenta esses solos.

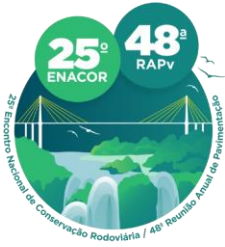
Tabela 1. Aspectos básicos dos solos

| SOLO | SLS | CA |
|--|--------------|-------|
| Limite de liquidez (%) | 43 | 49 |
| Limite de plasticidade (%) | 31 | 36 |
| Índice de plasticidade (%) | 12 | 13 |
| Massa específica real (g/cm ³) | 2,59 | 2,74 |
| % pedregulho (> 2,0 mm) | 6 | 0 |
| % areia grossa (0,6 - 2,0 mm) | 16 | 3 |
| % areia média (0,2 - 0,6 mm) | 11 | 7 |
| % areia fina (0,06 - 0,02 mm) | 12 | 9 |
| % silte (2 µm - 0,06 mm) | 12 | 16 |
| % argila (< 2 µm) | 43 | 65 |
| Classificação MCT | LG' | LG' |
| Classificação SUCS | MH | CL |
| Classificação TRB/AASHTO | A-7-5 (IG:8) | A-7-6 |



Figura 1. Solos utilizados: (a) escala real em centímetros e (b) escala microscópica.

Os resultados destas curvas de compactação foram confrontados com os dados de controle executivo de trechos onde estes materiais foram extraídos. A verificação do controle de umidade e da densidade da execução da compactação desses materiais em campo foi realizada por meio dos métodos do



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



cilindro de cravação e frasco de areia, regulamentado pelas normas NBR 9813 (ABNT, 2016) e NBR 7185 (ABNT, 2016), respectivamente.

Ensaio de Compactação Segundo a Metodologia da ABNT

A norma NBR 7182 (ABNT, 2016) estabelece uma metodologia e condições necessárias para a realização do ensaio de compactação de solos. Na norma, podem ser utilizadas duas diferentes dimensões de cilindros metálicos: o cilindro metálico pequeno (cilindro Proctor) e o cilindro metálico grande (cilindro de Índice de Suporte Califórnia – ISC). O cilindro Proctor possui diâmetro de 100,00 mm e altura de 127,30 mm, com um volume útil de 1000 cm³. Em contrapartida, o cilindro ISC possui diâmetro de 152,40 mm e altura de 114,3 mm, totalizando um volume útil de 2085 cm³. Ao molde cilíndrico metálico deve ser acoplado ao topo um cilindro complementar, e o conjunto todo fixado numa base rotatória do compactador. Além das duas dimensões de cilindro, existem dois soquetes distintos usados: o soquete Proctor, com massa de 2500 g e altura de queda de 305 mm, e o soquete ISC, com massa de 4536 g e altura de queda de 457 mm. As combinações da utilização dos moldes cilíndricos, soquetes e números de camadas para as EN e EI são expressas na Tabela 2.

Tabela 2. Requisitos preconizados para a compactação (Fonte: adaptado de ABNT, 2016).

| Cilindro | | Energia | |
|----------|------------------|---------|---------------|
| | | Normal | Intermediária |
| Proctor | Soquete | Proctor | ISC |
| | Número camadas | 3 | 3 |
| | Número de golpes | 26 | 21 |
| ISC | Soquete | ISC | ISC |
| | Número camadas | 5 | 5 |
| | Número de golpes | 12 | 26 |

Antes do início do ensaio, é sugerido dispor de um papel filtro no fundo do molde cilíndrico metálico, de maneira a evitar que o solo compactado fique aderido à base do molde. Depois de compactada a última camada, o cilindro complementar é retirado e o excesso de solo no molde é rasado com o auxílio de uma régua metálica biselada. Assim, pesa-se o conjunto molde e solo compactado, e então o corpo de prova é retirado com o auxílio de um extrator hidráulico, para depois serem retiradas amostras, a fim de ser obtida a umidade do solo. Recomenda-se a construção de uma curva de compactação com pelo menos cinco pontos válidos, sendo dois pontos situados no ramo seco, um ponto próximo à umidade ótima e dois pontos no do ramo úmido da referida curva.

Ensaio de Compactação Segundo a Metodologia do DNIT

Pela normativa do DNIT (2018), é regulamentado o uso de um molde cilíndrico tripartido de aço para a realização do ensaio de compactação de solos. Este possui dimensões internas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, ou 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, dependendo da granulometria da amostra a ser ensaiada, se ela é totalmente passante na peneira de 25,40 mm ou não. Assim como na normativa da ABNT (2016), esta sugere dois tipos de soquetes, o Proctor e o ISC, sendo a utilização de cada um dependente da energia a ser aplicada à amostra, bem como as dimensões



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



do cilindro tripartido e da altura de queda do soquete. Na Tabela 3 estão algumas combinações possíveis, segundo a normativa do DNIT (2018), para a compactação da amostra nas EN e EI. A metodologia proposta para a realização desse ensaio segue preceitos parecidos aos mencionados para o método da ABNT (2016). Inicialmente fixa-se o cilindro tripartido à base giratória do compactador, para então realizar a compactação das 10 camadas de solo dentro do molde. Após finalizado, pesa-se o molde com o corpo de prova compactado para posterior obtenção da massa específica, e retira-se duas amostras do interior do mesmo para verificação da umidade de compactação. O procedimento é repetido para obter-se 5 pontos válidos dentro da curva de compactação, sendo um próximo a umidade ótima do material, dois pontos sobre o ramo seco e outros dois pontos dentro do ramo úmido.

Tabela 3. Conceitos preconizados para a compactação (Fonte: Adaptado de DNIT, 2018).

| Cilindro | Soquete | Energia | |
|------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | | Normal | Intermediária |
| 10 x 20 cm | Número camadas | Pequeno (Proctor) | Pequeno (Proctor) |
| | Número de golpes | 10 | 10 |
| | | 12 | 27 |

Ensaio de Compactação Segundo a Metodologia da DNER

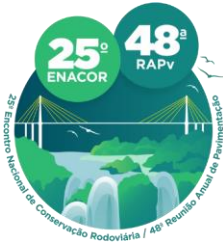
A metodologia proposta pelo DNER (1994) para realização de ensaios de compactação de solo se faz em cilindros com 50 mm de diâmetro e 130 mm de altura. Usa-se um soquete cilíndrico de aço leve (2270 g) ou um soquete cilíndrico de aço pesado (4540 g), ambos com altura de queda de 30,5 cm, sendo o primeiro para a energia normal e o segundo para a intermediária. Para o ensaio, coloca-se o molde cilíndrico sobre um pistão do compactador e despeja-se uma porção determinada de solo, passante na peneira com malha de 2 mm. De acordo com a normativa vigente citada, para solos lateríticos, essa porção é de 190 g, para solos siltosos caulínicos micáceos é cerca de 170 g e para solos argilosos não lateríticos é 180 g. Posteriormente, o soquete é adaptado sobre o topo da amostra e aplicado o número de golpes preconizado no material. Para a EN, é aplicado 4 golpes em solos argilosos e 5 golpes em solos siltosos e arenosos, com o soquete do tipo leve, já na EI, aplica-se 6 golpes com o soquete pesado. Após realizada essa etapa, o molde cilíndrico é invertido e aplica-se o mesmo número de golpes dados anteriormente. Com o auxílio do extrator do compactador, o corpo de prova é extraído, pesado e suas dimensões são anotadas, além de retirar porções de solo no centro da amostra para aferição da umidade.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Solo SLS

Para o solo SLS foram realizadas seis curvas de compactação, sendo uma curva em cada energia (normal e intermediária) para cada uma das três normativas avaliadas nesse trabalho. Na Figura 2 estão compilados os resultados obtidos nas curvas de compactação.

As curvas de compactação de cada uma das metodologias estão reunidas na Figura 3, juntamente com as respectivas curvas de saturação de 100%. Identifica-se nas curvas de compactação, para as três metodologias, que com o aumento da energia de compactação, há um aumento da MEAS enquanto a



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



umidade ótima decaí. Ademais, a variação dos parâmetros de umidade e massa específica ocorre de maneira mais intensa no ramo seco da curva, enquanto há variações quase insignificativas no ramo úmido ocorrendo a sobreposição dos resultados.

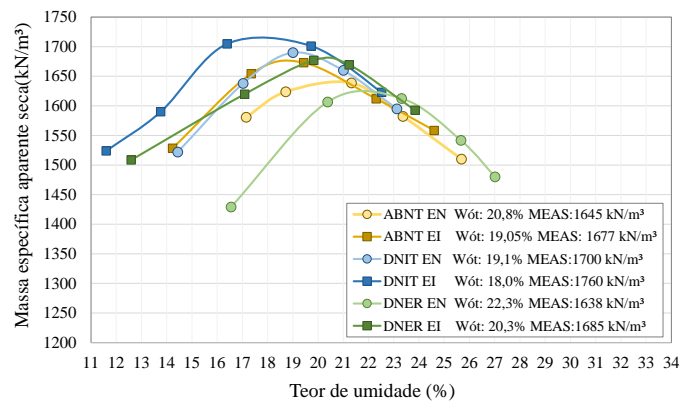


Figura 2. Curvas de compactação do solo SLS.

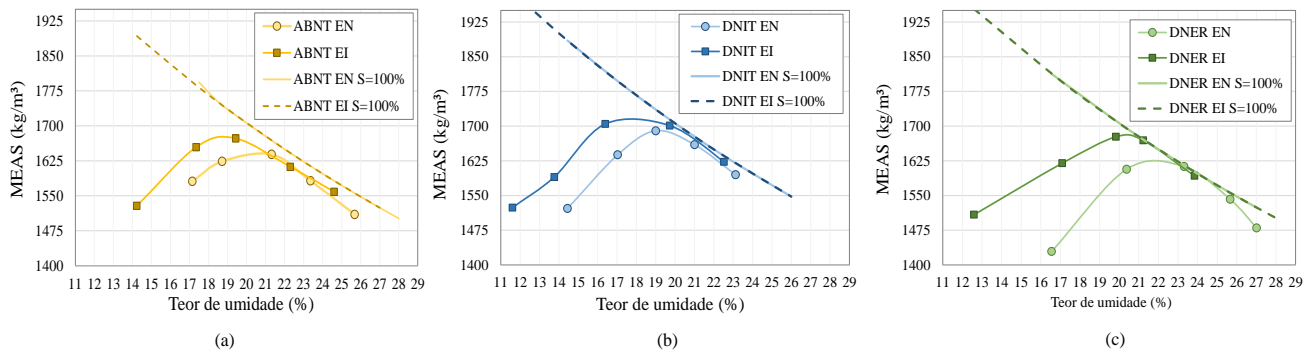
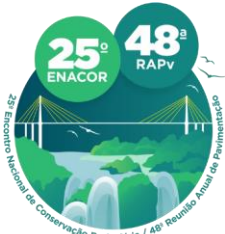


Figura 3. Curvas de compactação e Saturação 100% do solo SLS: (a) Metodologia ABNT (2016); (b) Metodologia DNIT (2018); (c) Metodologia DNER (1994).

Em campo, este material foi compactado na energia intermediária, em uma camada final de terraplanagem, resultando em uma massa específica aparente seca de 16,83 kN/m³ e umidade de compactação de 18,81%.

Solo CA

Assim como no solo SLS, para o solo CA também foram realizadas um total de seis curvas de compactação, abrangendo as energias normal e intermediária. A Figura 4 apresenta um compilado das curvas de compactação juntamente com os valores de umidade ótima e MEAS obtidos nestas. Na Figura 5 estão expressas as curvas de compactação do solo CA, para ambas as energias, sendo separadas de acordo com a metodologia empregada. Ademais, foram plotadas as respectivas curvas de saturação de 100% obtidas.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

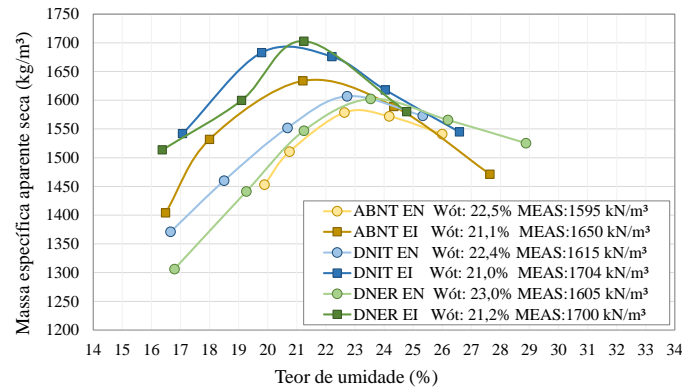


Figura 4. Curvas de compactação do solo CA.

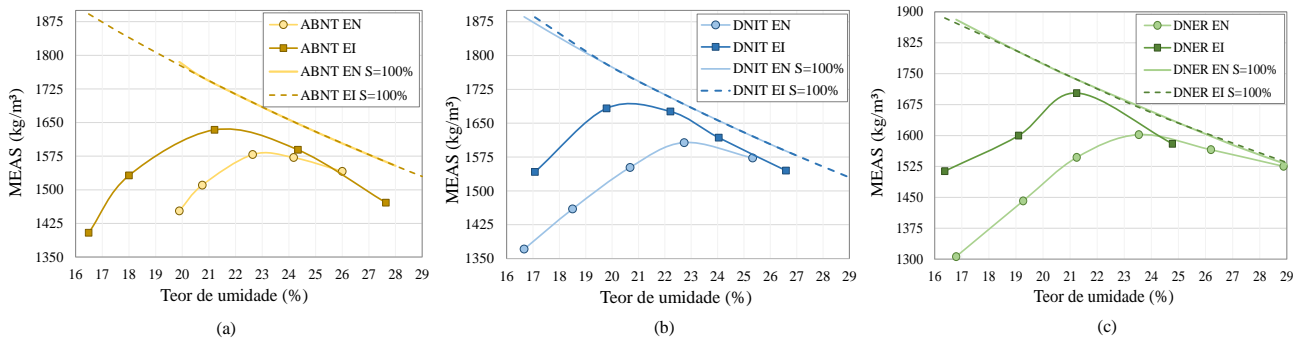
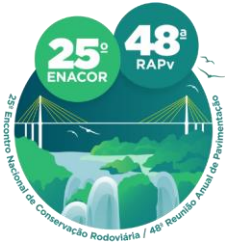


Figura 5. Curvas de compactação e Saturação 100% do solo CA: (a) Metodologia ABNT (2016); (b) Metodologia DNIT (2018); (c) Metodologia DNER (1994).

Quando executado em campo, o solo foi compactado na energia normal no corpo do aterro, resultando em uma MEAS de 12,00 kN/m³ e umidade de compactação de 46,07%. Já na camada final de terraplanagem, executada na energia intermediária, obteve-se uma umidade de compactação de 21,52% e MEAS de 16,45 kN/m³.

Comparação dos resultados

Na Figura 6 podem ser observados os resultados de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima das 12 curvas de compactação realizadas. Destacam-se os valores médios das metodologias quando consideradas as energias normal (μ_n) e intermediária (μ_i). Para o solo SLS nota-se que em ambas as energias de compactação, a MEAS se apresentou semelhante entre as metodologias da ABNT (2016) e do DNER (1994). Na EN, a diferença entre as metodologias se deu em magnitudes de 0,43%, variando entre 1638 e 1645 kN/m³, e na EI correspondeu a 0,47%, ficando nas faixas de 1677 a 1685 kN/m³. A metodologia proposta pelo DNIT (2018) resultou nos maiores valores de densidade máxima, na EN esse valor foi de 1700 kN/m³ e na EI de 1760 kN/m³. Em relação a umidade ótima, os resultados se mostraram com discrepâncias pertinentes. Em ambas as energias a maior umidade ótima foi encontrada pela normativa do DNER (1994), 22,3% para a EN e 20,3% para a EI, e os valores mínimos foram obtidos na compactação pelo cilindro tripartido, 19,1% para a EN e 18,0% para a EI.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Os resultados da umidade ótima pelas premissas da ABNT (2016) apresentaram-se muito próximos dos valores médios entre os intervalos das duas outras metodologias. As variações entre os mínimos e máximos da umidade ótima se deram em magnitudes de 15,55% e 12,05% para as EN e EI, respectivamente.

Ao analisar os resultados das curvas de compactação do solo de CA na EN, nota-se uma similaridade expressiva entre os resultados dos três métodos. Os valores obtidos para a MEAS ficaram dentro da faixa de 1595 kg/m³ e 1615 kg/m³, uma variação em torno de 1,24%. Em relação a umidade ótima para as metodologias da ABNT (2016) e do DNIT (2018), os valores foram de 22,5% e 22,4% respectivamente, representando diferença de 0,44%, já pela normativa do DNER (1994), o valor da umidade ótima calculada foi de 23,0%, variando cerca de 2,6% dos demais. Na EI, os resultados da umidade ótima nos três métodos foram muito semelhantes, já em relação a MEAS houve uma conformidade entre as metodologias do DNIT (2018) e do DNER (1994), enquanto o valor obtido pela regulamentação da ABNT (2016) se mostrou abaixo dos demais. Pela normativa da ABNT (2016) obteve-se uma densidade máxima de 1650 kg/m³ e umidade ótima de 21,1%. Com a metodologia do DNIT (2018), a MEAS foi de 1704 kg/m³ e umidade ótima de 21,0%. Por fim, a umidade ótima e densidade máxima encontradas para o ensaio em corpos de prova miniatura foram de 21,2% e 1700 kg/m³, respectivamente. A variação da umidade ótima entre as três metodologias se deu em magnitudes menores que 1,0%, e a densidade máxima divergiu aproximadamente em 0,24% entre as metodologias do DNIT (2018) e DNER (1994). Entretanto, nota-se uma maior diferença na MEAS obtida com base nas diretrizes da ABNT (2016), cerca de 3,2% em relação as demais. A menor umidade ótima observada se deu nos resultados usando o cilindro tripartido, em ambas as energias, enquanto a maior umidade ótima nessas energias se deu na compactação em equipamento miniatura. Em relação a MEAS, os valores mínimos encontrados foram na metodologia da ABNT (2016), e os máximos valores ocorreram nos resultados da normativa do DNIT (2018).

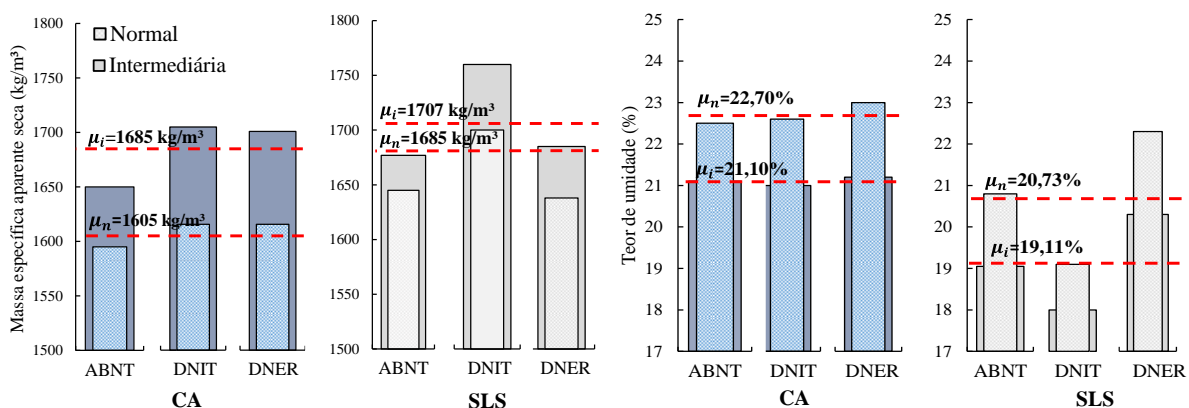
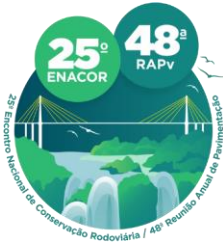


Figura 6. Comparação dos resultados: (a) Massa específica aparente seca; (b) Umidade ótima.

Com o intuito de quantificar e conseguir uma melhor visualização sobre as magnitudes das diferenças entre os resultados obtidos nas curvas de compactação, foi construída a Figura 7. Nestas, estão expressos os montantes da variação dos resultados da MEAS e da umidade ótima, tendo como referência os resultados encontrados na metodologia do DNIT (2018). Foi escolhido ter como referência os resultados do cilindro tripartido em razão de ser uma metodologia mais recente, por estar ganhando uma maior abrangência e por ser essa a metodologia especificada para a compactação



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



de amostras a serem submetidas aos ensaios triaxiais de cargas repetidas de módulo de resiliência e de deformação permanente.

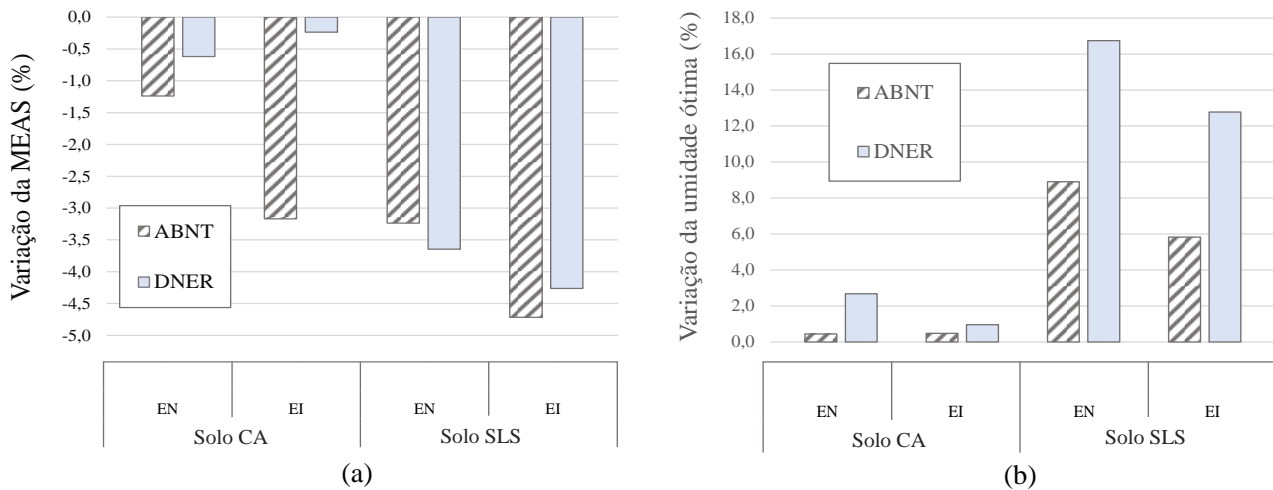


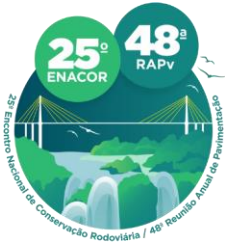
Figura 7. Variações dos resultados em relação a metodologia DNIT (2018): (a) MEAS; (b) umidade ótima.

As diferenças nos resultados das curvas de compactação, tendo como referência a metodologia do DNIT (2018), foram mais significativas no solo SLS para ambas as metodologias comparadas, essas magnitudes alcançaram valores de -4,72% na MEAS e +16,5% na umidade ótima. O solo CA apresentou valores muito similares entre a maioria dos resultados, apenas a MEAS pela metodologia ABNT (2016) se mostrou destoante. Ademais, em todas as diferenças na MEAS obteve-se valores negativos, ou seja, todos os demais resultados da densidade máxima foram inferiores aos da compactação com cilindro tripartido, ao passo que todos os resultados comparados da umidade ótima se mostraram superiores a esta metodologia - a normativa do DNER (1994) se mostrou com as maiores variações em ambos os tipos de solos pelas duas energias de compactação. Já para os valores da MEAS, os valores mínimos encontrados em geral foram pelas premissas da ABNT (2016), exceto para o solo SLS na EN.

Em relação as MEAS obtidas em campo para o solo SLS na EI, a máxima variação foi de 2,67% em relação ao obtido em laboratório pela metodologia DNER. No mesmo viés comparativo, a oscilação da umidade ótima situou-se na faixa de 1,54% a 18,55% entre as metodologias. Salienta-se que esta dispersão menos acentuada (1,54%) foi em relação a metodologia ABNT e a maior para o DNER. Entretanto, o solo de CA apresentou dispersões estatisticamente significativas entre os resultados medidos *in situ* e os obtidos em laboratório. Sendo a diferença da MEAS na EN de 34% e na EI de 0,59 a 3,59%. Para a umidade ótima esta tornou-se relevante do ponto de vista estatístico, na EN a discrepância dos valores medidos *in loco* e em laboratório de 52%. Já para a EI este valor variou entre 1,49% e 2,42%. Tal fato denota a importância do controle tecnológico nas obras de infraestrutura viária.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho em questão teve como premissas a comparação entre as metodologias de compactação normatizadas pela ABNT (2016), DNER (1994) e DNIT (2018). A primeira já se apresenta como



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

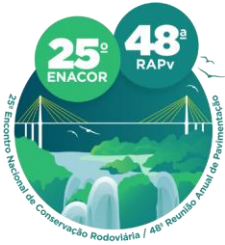


uma metodologia consolidada no ramo geotécnico nacional, enquanto a normativa com o uso do cilindro tripartido pode ser considerada ainda recente na área, voltada para projetos de pavimentação, e sendo regulamentada para a realização de ensaios triaxiais de cargas repetidas. A metodologia sugerida pelo DNER (1994) possui considerações pertinentes uma vez que demanda de uma quantidade reduzida de solo quando comparada as demais, além de o ensaio ser realizado em menor tempo. Para isto, optou-se pela utilização de dois diferentes solos, sendo possível também confrontar os resultados obtidos pelas curvas de compactação em relação às características físicas e geológicas dos materiais. Analisando os resultados num contexto geral, observa-se que a metodologia de compactação do DNIT (2018) apresentou os maiores valores de densidade máxima e os menores valores de umidade ótima para todas as análises realizadas. Em contrapartida, os maiores valores de umidade ótima foram encontrados pela normativa do DNER (1994) e os mínimos valores de MEAS foram, em sua maior parte, encontrados pela metodologia da ABNT (2016).

Quando comparadas as variações obtidas nos resultados entre os dois tipos de solos, nota-se que essas diferenças se mostraram inferiores para o solo CA, tanto nos valores de MEAS quanto nos de umidade ótima. Salienta-se que tal fato pode estar vinculado com o processo de formação do solo, apesar de ambos apresentarem a argila como maior fração granulométrica. O solo CA apresentou o peso específico real dos grãos de $27,40 \text{ kN/m}^3$, sendo isso justificado pelo elevado teor de óxidos de ferro, comumente observados em solos residuais de basalto. Além disso os óxidos de ferro afetam diretamente na plasticidade do material, o que torna o solo mais coeso e, conseqüentemente, com menos suscetível a deformações excessivas. Além disso, este elemento químico, pode atuar como um cimento natural, o que resultará na aglomeração das partículas e, em geral, vai aumentar a resistência do solo compactado. O solo de SLS apresentou densidade real dos grãos de $2,59$ sendo este consoante com a presença de minerais primários (quartzo, identificado na Figura 1). Ao comparar os limites de Atterberg, tanto o solo CA quanto o SLS, apresentaram elevada plasticidade. Outra hipótese que deve ser levantada refere-se à contribuição do esforço de compactação nas características estruturais do solo, já que ambos os solos diferem quanto ao seu arranjo e como ocorrerá a redução dos poros. Com isso, conclui-se que o solo SLS apresenta maiores variações devido às suas características intrínsecas. Cita-se como exemplo o tamanho dos poros visualmente maiores (Figura 1; b) que resultarão em uma menor retenção de água. Tal fato acarretará uma menor quantidade de água para “lubrificar” as partículas durante o processo de compactação, o que poderá resultar em uma maior variação da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo. Em contrapartida, essa variação será menos atenuante no solo CA que apresentou uma maior capacidade de retenção de água.

Nota-se ainda que em umidades acima da umidade ótima do material (pontos presentes no ramo úmido), o incremento da energia de compactação se mostrou menos eficiente, não sendo observados aumentos expressivos na densidade dele. As curvas de compactação nas energias normal e intermediária se mostraram expressamente similares em umidade elevadas, tangenciando-se em certos pontos. Este fenômeno pode ser explicado pois nesse estado o material apresenta uma quantidade elevada de água preenchendo seus vazios, e o aumento energia aplicada na compactação não se mostra eficiente na eliminação do ar restante nos vazios. Ademais, nas Figuras 3 e 5 é confrontado as curvas de saturação de 100% com as curvas de compactação, sendo possível perceber que estas se aproximam e tangenciam a curva de saturação de 100%, mas não igualando-se, uma vez que não é possível remover todo o ar existente nos vazios do material durante a compactação.

Diante do exposto, é perceptível que há certas variações nos resultados obtidos quando comparadas as três diferentes metodologias, tanto para os valores de densidade máxima quanto para os valores de



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



umidade ótima. Assim, pode-se concluir a relevância de ser adotada uma única metodologia de compactação durante todo o processo de análise do solo, não sendo aconselhável a confrontação de resultados de diferentes metodologias. Quando é desejado o uso de ensaios triaxiais de cargas repetidas para obtenção de parâmetros do solo no dimensionamento de pavimentos, tais como módulo de resiliência e deformação permanente, deve-se ser seguida a normativa do DNIT (2018), uma vez que as premissas do ensaio regulamentam corpos de prova neste molde. Além disso o estudo denotou a importância do controle tecnológico em obras de pavimentação, já que os resultados apresentaram elevada dispersão com os obtidos em laboratório para todas as metodologias, sendo essa variação significativa para o solo CA.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FIEIX, CAPES, ANP/ Petrobras e à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pelas bolsas de pesquisa disponibilizadas. Agradecemos também ao apoio recebido para o desenvolvimento desta pesquisa através do Termo de Execução Descentralizada – TED No 00545/2022/ IPR/ DPP/ DNIT SEDE (SEI 12931123), celebrado entre esta Autarquia e UFSM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação. 9p, Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7185: Solo – Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9813: Solo – Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego do cilindro de cravação. Rio de Janeiro, 2016.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros, PETROBRAS, ABEDA, Rio de Janeiro, 2022.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. C., REZENDE, L. R., CARDOSO, F. B. F., LUCENA, L. C. F. L., GUIMARÃES, R. C., VALENCIA, Y. G. Tropical soils for highway construction: Peculiarities and considerations. *Transportation Geotechnics*, 3-19, 2015.
- CRISPIM, F. A., LIMA, D.C., SHAEFER, C. E. G. R., SILVA, C. H. C., CARVALHO, C. C. B., BARBOSA, P. S. A., BRANDÃO, E. H. The influence of laboratory compaction methods on soil structure: mechanical and micromorphological analysis. *Soils and Rocks*, 34, 91-98, 2011.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 228: Solos – Compactação em equipamento miniatura. 14p, 1994.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 134-ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M.G. Mecânica dos Pavimentos. 3. ed., Interciência, Rio de Janeiro, 2015.3
- PETROBRÁS. Rede temática de asfalto – Manual de execução de trechos monitorados. Petróleo Brasileiro AS. Rio de Janeiro, 2010.
- ZUCCHI, F. L., PASCOAL, P. T., SANTOS, T. A., MENDES, T. C., BARONI, M., PINEHIRO, R. J. B. Análise Comparativa entre as metodologias de compactação da ABNT (2016) e REDE (2010) para solo argiloso e arenoso do estado do Rio Grande do Sul. 33º Congresso de Pesquisas e Ensino de Transporte da ANPET, 1970-1980, 2019.