

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO ENSAIO DE DCP NA CONSTRUÇÃO DE UM PAVIMENTO DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO

Emanuel de Souza Martins (Universidade Federal de Uberlândia) E-mail: emanuel.martins@ufu.br

Giovana Bizão Georgetti (Universidade Federal de Uberlândia) E-mail: ggeorgetti@ufu.br

Rodrigo Pires Leandro (Universidade Federal de Uberlândia) E-mail: rodrigo.leandro@ufu.br

Resumo: Este trabalho teve como objetivo analisar a aplicabilidade do ensaio de DCP (Dynamic Cone Penetrometer) em uma obra de pavimentação com o intuito de auxiliar na verificação da capacidade de suporte das camadas compactadas. O equipamento foi utilizado em campo nas camadas de subleito, sub-base e base de um pavimento asfáltico de comportamento flexível. Foram realizados diversos furos por camada e calculados os respectivos valores de índice de penetração do solo (DN) que foram relacionados com outros parâmetros geotécnicos. Obteve-se sucesso ao comparar DN com o grau de compactação e ao analisar a homogeneidade das camadas compactadas. Por fim, considerando os resultados deste trabalho, é possível afirmar que o equipamento DCP tem potencial para auxiliar o controle de obra, principalmente no auxílio à fiscalização de serviços de compactação.

Palavras-chave: Compactação de solo, DCP, Pavimentação.

EVALUATION OF THE APPLICATION OF THE DCP TEST IN THE CONSTRUCTION OF A LOW TRAFFIC VOLUME PAVEMENT

Abstract: The aim of this work was to analyze the applicability of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) test in pavement construction with the purpose of assisting in verifying the bearing capacity of compacted layers. The equipment was used in the field on the subgrade, sub-base, and base layers of a flexible asphalt pavement. Several holes were drilled per layer, and the respective soil penetration index values (DN) were calculated and related with other geotechnical parameters. In this paper, a relationship was established between a DN value and the degree of compaction. Furthermore, it was possible to analyze the homogeneity of the compacted layers. Finally, considering the results of this work, it is noted that the DCP equipment has the potential to assist in construction control, especially in compaction inspection services.

Keywords: Soil compaction, DCP, Pavement.

1. Introdução

O processo de formação de solos se dá, em parte, por ações de intempéries, responsáveis pelo desgaste da rocha mãe e de sua gradativa transformação em sedimentos. Como consequência, os solos se diferenciam pela sua origem e posição, ou seja, sua composição química e física depende do tipo de rocha e de sua localização anterior (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). Em vista da grande heterogeneidade resultante dos processos de formação, o conhecimento das propriedades de cada tipo de solo, para utilizá-lo em distintas obras e funções geotécnicas, é relevante. Para isso, o trabalho em laboratório aliado ao controle tecnológico em campo, auxiliam os engenheiros no processo de escolha dos materiais e das técnicas a serem aplicadas.

Medidas e controle de propriedades como o Índice de Suporte Califórnia (CBR), teor de umidade ótimo e grau de compactação são importantes rotinas em obras rodoviárias em todas as suas fases. Neste contexto, o Cone de Penetração Dinâmica (DCP) pode ser

estudado como uma alternativa para o controle de compactação em campo. Essa alternativa surge como um meio mais rápido, prático e de baixo custo para prever capacidade de suporte de solos (TORRES, 2017 e BENEVIDES, 2012).

Em obras de terraplenagem e pavimentação, um controle tecnológico adequado é essencial para garantir a qualidade do produto final. Dentro dos processos habituais, a aprovação e liberação de uma camada compactada pode levar até 30 minutos, pois envolve o deslocamento da equipe, execução do furo, aferição da umidade, cálculos e muitas vezes, há a necessidade de aumentar a energia de compactação com passadas adicionais do rolo compactador, exigindo que o processo de controle tecnológico se reinicie. Enquanto isso, equipes inteiras, máquinas e equipamentos ficam ociosos, reduzindo a eficiência do empreendimento. Considerando que a realização do ensaio DCP leva cerca de 5 minutos, aplicar essa técnica na rotina de controle tecnológico em substituição ao tradicional frasco de areia pode gerar uma economia de 80% no tempo de execução.

Normatizado pela ABNT NBR 17091/2023, o ensaio de DCP consiste em inserir um cone padronizado no maciço, utilizando a massa de um martelo, realizando medições de penetração no material analisado. Com estes dados, é possível realizar correlações com parâmetros de referência, como o CBR, grau de compactação, ou emitir relatórios com grande rapidez, dada a simplicidade de cálculo e interpretação dos resultados. Além disso, o ensaio DCP possibilita a identificação de mudança de camadas de solos pela alteração na inclinação da reta da relação DN-Número de golpes (FONTES, 2001).

Aliando esta técnica à pluralidade de solos existentes em regiões tropicais, faz-se necessária a compreensão dos fenômenos que ocorrem ao realizar este ensaio, bem como a interpretação em distintos perfis de solos. Deste modo, o objetivo desse trabalho foi avaliar a utilização do equipamento de DCP em uma obra de pavimentação asfáltica, com intuito de complementar o serviço de fiscalização da qualidade das camadas compactadas.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Compactação de solos

Compactação é um processo artificial, que tem como objetivo reorganizar as partículas de uma massa de solo a fim de obter maior massa específica de sólidos, reduzir o índice de vazios e elevar a resistência por meio de aplicação de energia mecânica (KIM; PREZZI; SALGADO, 2010). Tal processo pode acontecer pela aplicação de força animal, ferramentas manuais, ferramentas mecanizadas e máquinas específicas. Em obras geotécnicas, a eficiência da compactação garante aumento da capacidade de suporte dos materiais, menor deformabilidade e maior estabilidade à ação da água (SOUZA JUNIOR, 2005). Na evolução histórica do processo de compactação, Proctor, em 1933, estabeleceu o ensaio de compactação, que relaciona massa específica aparente seca, teor de umidade e energia de compactação.

Schlogel (2015) menciona que ao variar a energia de compactação, bem como a quantidade de água adicionada, o solo apresenta comportamento distinto durante sua compactação e que, dependendo do teor de umidade, tem-se valores diferentes de massa específica seca. A variação dos valores desse parâmetro em função da quantidade de umidade se dá pelo processo de lubrificação das partículas, mas é importante ressaltar que, a partir de um certo teor de umidade, a água passa a dificultar a densificação do solo, não mais colaborando no processo de compactação (MILLÉO, 2012). A influência da umidade na densificação do solo pode ser visualizada na Figura 1.

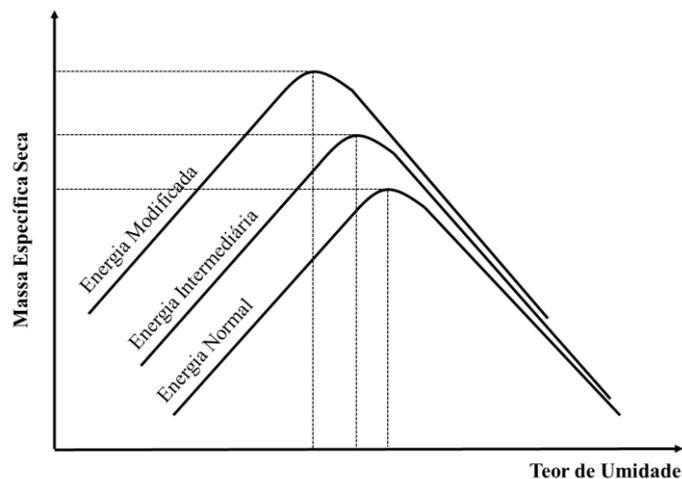


Figura 1 – Curva de compactação típica

Tendo em vista a importância da qualidade da compactação no desempenho dos pavimentos, as diretrizes dos projetos rodoviários exigem controle quanto aos materiais e técnicas utilizadas (DER-MG, 2008). Os principais testes realizados para o controle de qualidade das camadas de materiais geotécnicos compactados são o de frasco de areia e de Viga Benkelman. Sendo o primeiro utilizado para atestar o grau de compactação através de comparação da massa específica do solo compactado com a de projeto, e o segundo, afere as deflexões da camada compactada.

2.2 Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

O DCP foi desenvolvido na Austrália por Scala em 1956 com a premissa de analisar os subleitos das obras de pavimentação (CARDOSO e TRICHÊS, 1998, *apud* FONTES, 2001). Desde então, o equipamento sofreu alterações em seu *design*. Pesquisas foram desenvolvidas buscando novas aplicações e, em 1973, na África do Sul, foi utilizado pelo Departamento de Estradas daquele país para investigações mais rápidas nas camadas dos pavimentos locais (ALVES, 2002). O equipamento é de baixo custo de aquisição, fácil aplicação, baixo tempo de realização do ensaio e permite explorar uma profundidade de até 2000 mm de solos finos e granulares (ALVES, 2002). Ele é constituído por hastes de 16 e 25 mm, régua graduada para medição da penetração e um martelo de 8 kg que deve cair de uma altura de 575 mm até atingir a parte inferior do equipamento. Possui, ainda, uma haste inferior com ponteira cônica de aço com abertura de 60°. No Brasil, o ensaio foi normatizado pela ABNT NBR 17091/2023. Na Figura 2 é mostrado o desenho esquemático de um DCP.

Dentre os cuidados que se deve ter com o equipamento, destaca-se o correto acoplamento entre as partes superior e inferior, a verificação do diâmetro da ponta de aço (20 mm), visto que com o uso pode sofrer desgaste e esse não pode ultrapassar a 10%. Deve-se, ainda, corrigir o alinhamento vertical do equipamento, sendo que o deslocamento máximo não pode superar 75 mm do eixo vertical enquanto a penetração é executada.

Para utilização do DCP, basta posicioná-lo em prumo, subir o martelo até o topo da haste e deixar cair até a base, contando um golpe. As medições de profundidade são feitas a cada três golpes e até a profundidade desejada, não podendo superar os 2000 mm. A penetração não pode ser inferior a 2 mm em cinco golpes consecutivos. Os valores devem ser anotados em uma planilha de controle e os resultados lançados em um gráfico de Número de golpes por Penetração (mm). A partir desse gráfico, pode-se calcular o Índice de Penetração (DN ou IPD) pela utilização da equação 1.

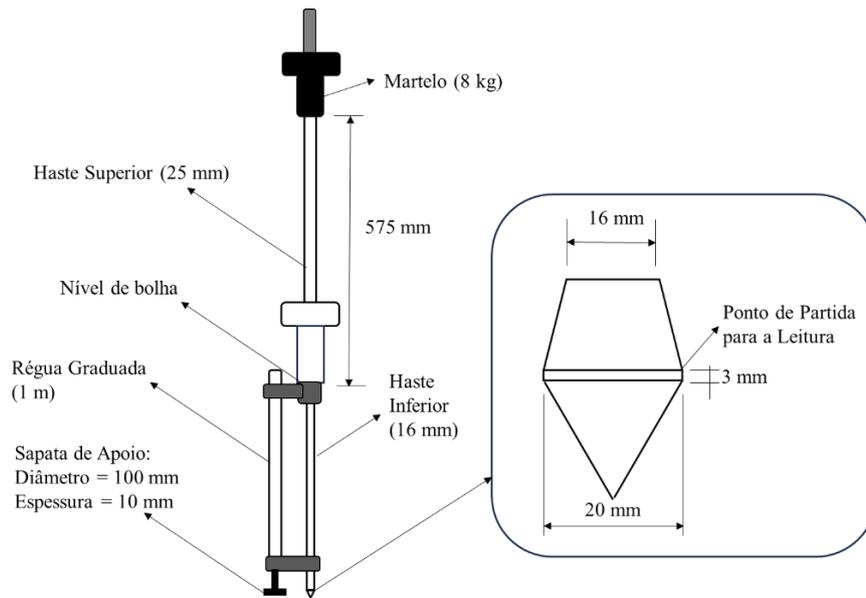


Figura 2 – Esquema do equipamento DCP

$$I_{PD} \text{ ou } DN = \frac{(pf - pi)}{n} \text{ (mm/golpe)} \tag{eq. (1)}$$

onde,

pf é a penetração final em mm;

pi é a penetração inicial em mm;

n é o número de golpes.

Na Figura 3 é mostrado um gráfico típico do resultado do ensaio com os valores de DN. Conforme a inclinação das retas de profundidade-número de golpes, pode-se inferir informações sobre a resistência do maciço estudado. Por exemplo, para inclinações mais acentuadas (DN maiores), esperam-se materiais mais soltos, menos resistentes, ao passo que, se a inclinação for menor, associa-se uma resistência maior do material (ALVES, 2002). Pode-se, também, avaliar a homogeneidade de compactação de uma camada de solo ao longo de sua espessura em função da inclinação das retas, sendo que, nos casos em que não ocorrem mudanças de inclinação, encontram-se camadas com compactação homogênea.

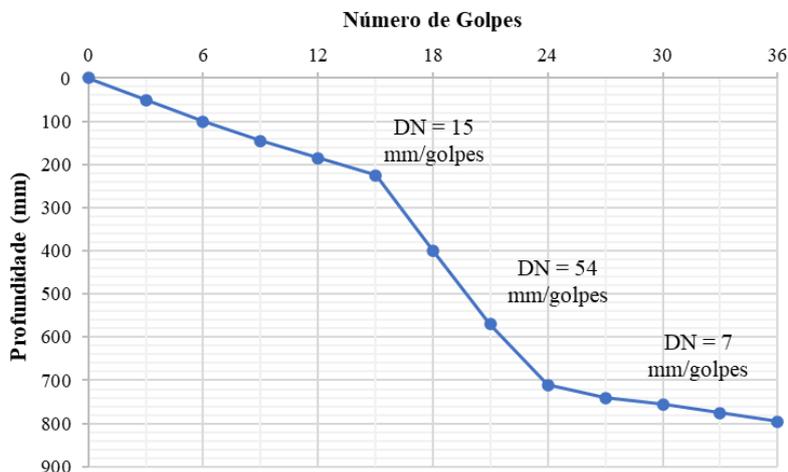


Figura 3 – Curva característica do DCP

3. Materiais e Métodos

Para avaliar a adequação do uso do DCP em obras de pavimentação de baixo volume de tráfego na região de Uberlândia (Minas Gerais), foram realizados testes em campo em diferentes pontos das camadas de subleito, sub-base e base de pavimentos de vias de baixo volume de tráfego durante a implantação da infraestrutura de um condomínio residencial. O material do subleito foi composto por solo argiloso local, a sub-base por uma mistura de argila e material granular, enquanto para a camada de base utilizou-se um material granular denominado de “cascalho de jazida”.

Os materiais de cada uma das camadas foram caracterizados em laboratório pela execução dos ensaios de distribuição granulométrica, compactação e CBR. Todos os procedimentos experimentais para obtenção de tais parâmetros seguiram as instruções normativas brasileiras. Na Tabela 1 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização desses materiais e a respectiva classificação TRB.

Tabela 1 - Características geotécnicas dos materiais utilizados nas camadas do pavimento

Camada	Granulometria ¹				Classificação TRB	Teor de Umidade Ótimo [%]	Massa específica seca máxima [g/cm ³]	CBR [%]
	Pedregulho [%]	Areia [%]	Silte [%]	Argila [%]				
Subleito	0	6,5	14,3	79,2	A-4	27,9	1,415	13
Sub-base	32,1	7,1	22	38,8	A-6	15,5	1,870	28
Base	55,1	23,3	16,9	4,7	A-1a	9,2	2,137	86

¹As faixas granulométricas são as definidas pela ABNT NBR 6502:2022.

A compactação das camadas foi executada com a utilização de um rolo pé de carneiro vibratório. Os ensaios de DCP foram realizados imediatamente após a verificação do grau de compactação (GC) de cada uma das camadas acabadas. A liberação das camadas aconteceu depois da mensuração do GC e do teor de umidade em campo pela utilização dos métodos de frasco de areia e secagem do material em fogareiro, respectivamente. Sendo assim, os furos dos ensaios de DCP foram executados na mesma região aprovada, no eixo e bordos, sendo 11 furos para a camada de subleito, 14 para a sub-base e 11 para a base. Na Figura 4 é mostrada a execução de um dos ensaios de DCP.



Figura 4 – Execução do ensaio DCP na camada de sub-base

A preparação das camadas envolveu a escarificação da superfície, homogeneização da unidade com caminhão tanque e trator de grades, nivelamento utilizando motoniveladora e, por fim, compactação utilizando rolo pé de carneiro. Ao final da compactação mecânica, verificou-se a existência de materiais desconfiados na superfície que foram incorporados à camada superior durante as etapas de homogeneização e nivelamento. Na execução da última camada geotécnica (base granular), eliminou-se a presença de materiais soltos para permitir a adequada execução posterior do serviço de imprimação.

4. Apresentação e análise dos resultados

A investigação do nível e da homogeneidade de compactação das camadas de subleito, sub-base e base foi realizada pela análise dos gráficos dos resultados de DCP. Nas Figuras 5, 6 e 7 são apresentados os gráficos da relação profundidade-número de golpes para cada uma das camadas ensaiadas. Os furos de ensaio foram distribuídos entre eixo e bordos do pavimento. As profundidades atingidas foram correspondentes às espessuras de projeto das camadas: 15 cm para subleito, 10 cm para sub-base e 10 cm para base.

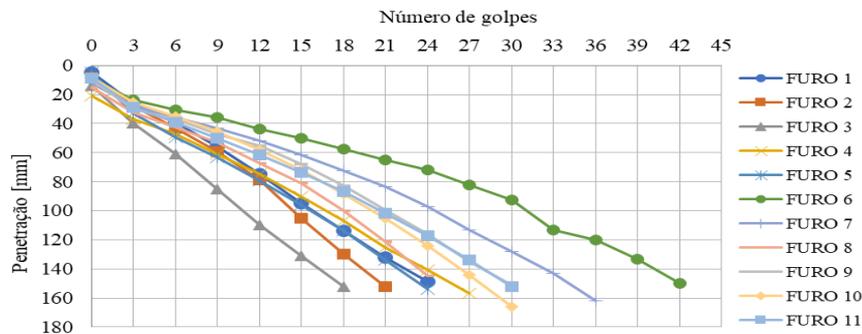


Figura 5 – Resultados de DCP para a camada de subleito

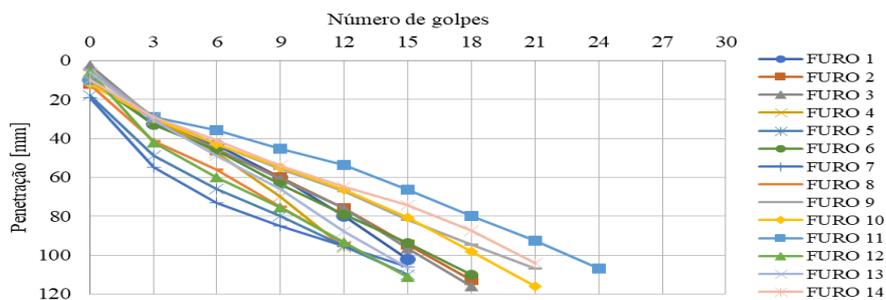
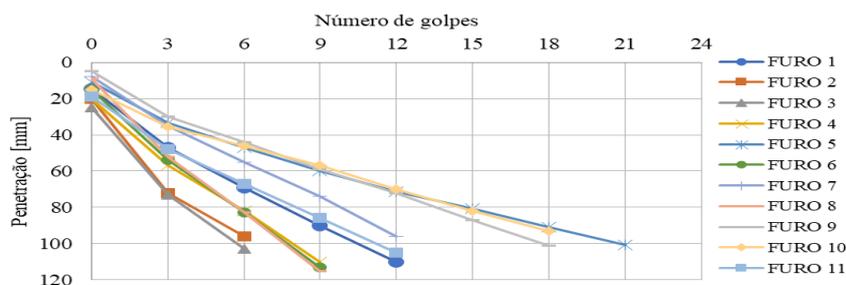


Figura 6 – Resultados de DCP para a camada de sub-base



Analisando-se os resultados das figuras 5, 6 e 7, verifica-se que a distância horizontal entre as linhas é indicativa de dispersão no nível de compactação das camadas nas diferentes áreas ensaiadas. Esse comportamento pode ser atribuído à heterogeneidade dos materiais compactados quando se comparam furos distintos. A partir das observações de campo quanto à execução das camadas, associadas a esses resultados, tem-se como hipótese para essa heterogeneidade, a má homogeneização de pré-compactação da camada e a existência de grão de elevada dimensão nas camadas de sub-base e, principalmente, na base.

Quanto à homogeneidade do nível de compactação em relação à espessura das camadas, observa-se que, nos trechos iniciais das linhas de penetração-número de golpes, a inclinação é mais acentuada. Essa tendência fica mais evidente pela análise da Tabela 2 em que são mostrados os coeficientes angulares médios dessa relação para cada uma das camadas. A variação de inclinação das linhas em função da profundidade é creditada ao desconfinamento superficial dos materiais na superfície das camadas após a compactação mecânica realizada pelo rolo pé de carneiro. Esse desconfinamento superficial atingiu cerca de 20 a 40 mm de profundidade. A partir daí, percebe-se que as linhas apresentam inclinação aproximadamente constante, indicando homogeneidade da compactação em função da espessura das camadas.

Tabela 2 – Coeficientes angulares médios das linhas de penetração-número de golpes

Número de Golpes	Subleito	Sub-base	Base
0 a 3	6,5	8,3	8,3
3 a 6	3,9	4,9	4,9
6 a 9	4,2	5,0	5,0
9 a 12	4,8	5,2	5,2
12 a 15	5,0	5,7	5,7
15 a 18	5,5	5,4	5,4
18 a 21	5,5	4,6	4,6
21 a 24	5,4	4,8	4,8

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios de DN e os respectivos desvios padrão por camada ensaiada, além dos resultados de GC e valores médios para 95% de confiabilidade. Pela análise da Tabela 3, nota-se que os valores do GC foram iguais ou superiores a 100%. Segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) o GC de camadas geotécnicas estruturais de pavimentos não pode ser inferior a 100%, portanto, tem-se neste caso que os valores aceitos de DN para liberação da compactação das camadas deveriam ser de no máximo 7,0 mm/golpe no fim do ensaio.

Tabela 3 - Valores de DN médios, massa específica seca máxima e grau de compactação por camada

Parâmetro	Subleito	Sub-base	Base
ρ_d [g/cm ³] – laboratório	1,415	1,870	2,137
ρ_d [g/cm ³] - campo	1,415	1,885	2,168
GC	100%	100,8%	101,4%
DN médio [mm/golpe]	5,4	5,9	7,4
Desvio padrão	1,01	1,19	2,45
DN ₉₅ médio [mm/golpe]	5,4	5,9	7,0
DN ₉₅ para os 3 primeiros golpes [mm/golpe]	6,4	8,0	11,5
DN ₉₅ final [mm/golpe]	6,0	6,0	7,2

Ainda pela Tabela 3, nota-se que os valores de DN apresentaram uma relação inversa com os resultados de massa específica seca máxima. Uma possível explicação para esses resultados é a granulometria dos materiais. A sub-base e a base foram compostas por 32,1% e 55,1% de pedregulho, respectivamente. Esse tamanho de fração de grãos é maior que 2 mm, podendo alcançar até 60 mm. Desse modo, tendo em vista que o diâmetro da ponteira de ensaio é de 20 mm, percebe-se, pela relação entre essas dimensões, que não é possível considerar as camadas de sub-base e base como apropriadas para os ensaios DCP.

5. Conclusão

Este trabalho avaliou a aplicabilidade do ensaio de DCP no controle de execução de camadas geotécnicas de um pavimento asfáltico para auxiliar nos processos de fiscalização de obra. Dentre as possíveis aplicações, o método se mostrou adequado para análise da homogeneidade das camadas compactadas em relação à profundidade, o que foi verificado pela inclinação constante da reta de penetração-número de golpes. Do mesmo modo, verificou-se que os resultados dos ensaios de DCP podem indicar variabilidade no nível de compactação de diferentes na área compactada.

Além disso, pode-se concluir que a aplicação do ensaio de DCP, em camadas geotécnicas compostas por frações granulométricas características de pedregulho, não foi satisfatória. Desse modo, sugere-se que a utilização desse tipo de equipamento para materiais de distribuição granulométrica mais grossa seja melhor avaliada.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D6951/D6951M-18: Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications.* West Conshohocken, PA, USA, 2018. 7p.

ALVES, A. B. C. *Avaliação da Capacidade de Suporte e Controle Tecnológico de Execução da Camada Final de Terraplenagem utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone.* Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/83257>. Acesso em: 13 mai. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 17091/23: Ensaio do Cone de Penetração Dinâmica.* Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2023, 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 6502/22: Solos e Rochas - Terminologia.* Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2022, 44p.

BENEVIDES, L. D. B. *Avaliação do uso do DCP em areias para controle da capacidade de carga em fundações diretas e controle de compactação de aterros.* Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/14836>. Acesso em: 13 mai. 2024.

CARDOSO, A.C.; TRICHÊS, G. *Avaliação da Capacidade de Suporte de Aterros e Subleito de Rodovias Utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone.* In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, XI, 1998, Brasília. Anais... p. 649-656.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS. *Manual de fiscalização de obras em vias rurais*. 1ª ed. DER-MG, Belo Horizonte: 2008. Disponível em: <https://www.der.mg.gov.br/institucional/legislacao/normas-tecnicas-deer>. Acesso em: 13 mai. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES. *Manual de Pavimentação*. 3ª ed. DNIT – RJ, Rio de Janeiro: 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/publicacao-ipr-719-manual-de-pavimentacao>. Acesso em: 13 mai. 2024.

FONTES L. P. T. L. *Contribuição a investigação geotécnica de vias urbanas não pavimentadas através do emprego do penetrômetro dinâmico de cone*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2001. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/81548>. Acesso em: 13 mai. 2024.

MILLÉO, I. A. F. *Análise de especificações de aterro e correlações entre CBR e capacidade de carga em solos compactados*. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2012. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/29030>. Acesso em: 13 mai. 2024.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. Editora Villibor, São Paulo, SP, 1995.

KIM, H; PREZZI, M; SALGADO, R. *Use of Dynamic Cone Penetration and Clegg Hammer Tests for Quality Control of Roadway Compaction and Construction*. Joint Transportation Research Program- Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.5703/1288284314246>. Acesso em: 13 mai. 2024.

SCHLOGEL C. V. *Uso do DCP para avaliação do Grau de Compactação de um solo na região oeste de Curitiba – PR*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – PR, 2015.

SOUZA JUNIOR, J. D. *O Efeito da Energia de Compactação em Propriedades dos Solos Utilizados na Pavimentação do Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia do Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2005. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/4860>. Acesso em: 13 mai. 2024.

TORRES V. C. A. *Ensaio de cone de penetração dinâmica para controle de compactação de vias urbanas da cidade de Curitiba/PR*. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2017.