

Correlação entre os Ensaios CBR e DCP para Solos Argilosos Residuais Basálticos

Thiago Nievola Sokalski
Engenheiro Civil, UniCesumar, Curitiba, Brasil, thiago.nievola@gmail.com

Edson Iurk Junior
Geólogo, IGeo Engenharia e Geotecnia Ltda., Curitiba, Brasil, edson.iurk@ufpr.br

RESUMO: Este trabalho apresenta correlações entre os ensaios CBR (*California Bearing Ratio*) e DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) para solos argilosos do terceiro planalto paranaense, na região da cidade de Londrina – PR. Foram utilizadas 10 amostras para execução dos ensaios laboratoriais, posteriormente, através de modelos matemáticos, foi possível identificar correlações entre os resultados obtidos. Visto que o equipamento DCP é de grande utilidade para avaliação de camadas de solo *in situ*, a obtenção de correlações entre os índices CBR e DCP para diferentes tipos de solo se faz necessária.

PALAVRAS-CHAVE: California Bearing Ratio, Dynamic Cone Penetrometer, Solos.

ABSTRACT: This work presents correlations between the CBR (*California Bearing Ratio*) and DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) tests to clayish soils from the third highland of Paraná, in Londrina's town region. It used 10 (ten) samples to execute the laboratory tests, after that, through math models, it was possible to identify correlations between the final results. Once the equipment DCP is very useful to "*in situ*" soil layers evaluation, the gathering of correlations between de CBR and DCP indexes to many different kinds of soil is necessary.

KEYWORDS: California Bearing Ratio. Dynamic Cone Penetrometer. Soils.

1 INTRODUÇÃO

O controle de qualidade empregado na compactação do solo, principalmente nas obras de pavimentação, é de grande importância e pode ser decisivo para a qualidade e durabilidade da estrutura que será projetada e posteriormente executada. Nas obras de pavimentação, os dados obtidos por meio dos ensaios de solo são utilizados no projeto de estruturas, assim como no controle de execução da obra.

Vários ensaios podem ser utilizados para controlar a compactação de um solo. Dos métodos disponíveis atualmente, o DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) tem conquistado espaço devido às vantagens relacionadas a sua praticidade em campo. Segundo Berti (2005), o DCP apresenta vantagens relacionadas a seu baixo custo e simples execução, proporcionando uma avaliação das diferentes camadas compactadas ou naturais. E, de acordo com Lima (2000), o DCP vem sendo aperfeiçoado desde a sua criação, e utilizado em várias regiões do mundo, como Austrália e África do Sul, por ser um ensaio executado rapidamente com baixo custo, além de não ser destrutivo. O ensaio CBR (*California Bearing Ratio*) também se mostra muito eficaz e é um ensaio base para projetos de pavimentação no Brasil e no mundo. Sendo desenvolvido em 1938 nos Estados Unidos, o ensaio CBR vem sendo utilizado até hoje devido a sua praticidade.

Segundo Berti e Paiva (2006), várias correlações DCP x CBR vêm sendo definidas no mundo todo por modelos bi-logarítmicos e exponenciais, e variam de acordo com o material utilizado e com a forma que os ensaios são executados.

Neste sentido, o presente trabalho busca analisar diferentes amostras de solo da região do terceiro planalto paranaense, que possui a maior extensão dentre as subdivisões do estado, objetivando identificar suas classificações e obter correlações CBR x DCP.

2 ÁREA DE COLETA DE AMOSTRAS

As amostras utilizadas são da região de Londrina-PR, a coleta ocorreu ao longo da PR-455, próximo aos municípios de Lerroville, Guaravera, Paiquerê e Irerê. Foram coletadas 10 amostras, cerca de 50 kg por amostra. A área de coleta está localizada no Terceiro Planalto Paranaense ou Planalto de Guarapuava, que apresenta uma formação datando da era mesozóica, a partir de derramamentos basálticos. O solo da região é popularmente conhecido como Terra Roxa, apresentando coloração avermelhada.

3 ENSAIOS LABORATORIAIS

A caracterização das amostras coletadas foi executada em laboratório e classificadas de acordo com o sistema TRB (*Transportation Research Board*), adotado pela AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e SUCS (*Sistema unificado de classificação de solos*).

Foram realizados ensaios de caracterização (granulometria, limites de Atterberg e densidade real dos grãos), ensaios de compactação, ensaios CBR e ensaios com DCP, de acordo com as normas vigentes.

Os ensaios de granulometria foram realizados de acordo com a NBR 7181:1984 - Solo - Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação e NBR 6457 - Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.



Figura 1. (A) Provetas dos ensaios de sedimentação, (B) Frações utilizadas no peneiramento grosso, (C) Jogo de peneiras utilizado e (D) Frações utilizadas no peneiramento fino, Autor (2001).

Os ensaios de massa específica dos grãos foram realizados de acordo com a NBR 6508:1984 – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica para identificar a densidade real dos grãos do solo, a partir do método do picnômetro grande e da bomba de vácuo. Os ensaios de Limites de Atterberg foram baseados na NBR 6459:2016 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez e NBR 7180:2016 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.



Figura 2. (A) Placa de vidro e solo utilizado, (B) Gabarito de metal e cilindro de solo, (C) Aparelho de Casagrande com a fenda no solo, Autor (2021).

Os ensaios de compactação foram realizados de acordo com a NBR 7180:2016 – Solo – Ensaio de compactação. Foram ensaiadas dez amostras e para cada uma delas foram compactados cinco corpos de prova, na energia proctor normal (12 golpes), com cinco camadas. Optou-se por compactar todas as amostras na mesma energia (normal), podendo assim submeter as amostras às mesmas condições de ensaio, facilitando a comparação e análise dos métodos e resultados. Os corpos de prova que apresentaram erros de compactação foram descartados e compactados novamente, mantendo cinco corpos de prova por amostra. Para cada corpo

de prova compactado foi coletada uma amostra do material para realização do ensaio de teor de umidade, buscando as melhores condições de compactação, para posteriormente obter as curvas de compactação de cada ensaio. Após a realização da compactação, os corpos de prova não foram submetidos a ensaios de expansão por imersão em água, foram realizados ensaios CBR e, posteriormente, os ensaios com DCP.



Figura 3. (A) Compactador elétrico, (B) Pesagem do corpo de prova, (C) Amostras de solo para ensaio de teor de umidade, Autor (2021).

Após ensaios de compactação, foram realizados os ensaios CBR em todos os corpos de prova compactados, sendo um total de cinquenta corpos de prova, de acordo com a NBR 9895:1987 – Solo – Índice de Suporte Califórnia. Os ensaios foram realizados na umidade de moldagem, sem a imersão em água para ensaio de expansão. Vale ressaltar que para o dimensionamento de pavimentos, de acordo com a norma vigente, é necessário o ensaio de expansão.



Figura 4. (A) Prensa elétrica automatizada, (B) Célula de carga e corpo de prova (C) Corpo de prova após o rompimento, Autor (2021).

Os ensaios de penetração de cone foram realizados de acordo com a norma americana ASTM D695:2018 - *Standard Test Method for use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*. O método consiste na realização do ensaio com DCP na face oposta à realização do ensaio CBR, nos corpos de prova.

Foram executados ensaios com DCP para cada corpo de prova ensaiado, utilizado um equipamento DCP com ponteira de 60°, normatizado. A ponteira do equipamento DCP foi cravada no solo antes do início dos golpes, a fim de desconsiderar a parte superficial do material compactado, conforme sugere Alves (2002), e nenhum dos golpes foi descartado. A profundidade de penetração nos corpos de prova foi em torno de 100mm, espessura referente à porção de solo compactado em cada cilindro. Os ensaios foram encerrados antes da cravação no disco de madeira, utilizado para preencher o furo causado pelo pistão do equipamento de rompimento CBR, protegendo a ponta do equipamento DCP e preenchendo o vazio.

Autores como Lima (2000) e Souza (2019) utilizaram metodologias semelhantes, executando os ensaios com DCP na face oposta ao rompimento do CBR, e utilizando um disco de madeira no orifício do rompimento. De acordo com Lima (2000), o processo de saturação dos corpos de prova, segundo as normas, é questionável porque geralmente o material encontrado em campo não está saturado. Sendo assim, a fim de simular uma condição de campo, onde o ensaio DCP geralmente é realizado em camadas de solo não saturadas, não foram realizados ensaios de expansão e os ensaios com DCP foram realizados logo após os ensaios CBR, ambos com o mesmo teor de umidade no corpo de prova. De acordo com Alves (2002), a capacidade de suporte de uma camada de solo pode ser avaliada com a utilização do equipamento DCP, o índice CBR exigido em projeto para a camada compactada, pode ser aferido no local da compactação (in situ) através do índice DN obtido com o ensaio. O valor de penetração que deve ser obtido em campo se chama “Índice de Penetração de Referência – DNref”, que é obtido através da curva de calibração.



Figura 5. (A) Realização de ensaio com DCP em laboratório, (B) Disco de madeira utilizado (C) Ponteira de 60° do DCP, (D) Corpo de prova com o disco de madeira, Autor (2021).

A partir dos resultados de CBR e DCP foi possível traçar os gráficos dos ensaios. Para cada corpo de prova ensaiado, um índice CBR obtido através das leituras de penetração no corpo de prova e um valor DN obtido através da penetração por golpe no ensaio com DCP, foi feita uma média de penetração para cada cilindro (mm x golpe). Os valores de CBR e DN de cada corpo de prova, um total de 50 pares, foram utilizados na obtenção de gráficos de regressão linear, gerando linhas de tendência (curvas de calibração). Além disso, também foi gerado um coeficiente de determinação (R^2) para cada linha de tendência obtida, que apresenta o nível de variação dentre os dados analisados, em uma escala entre 0 e 1, sendo que valores acima de 0,7 podem ser considerados satisfatórios, apresentando pouca variação.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização

As amostras analisadas apresentam grande quantidade de argila e silte, o Limite de Liquidez variou de 44% a 58%, o Limite de Plasticidade variou de 29% a 41% e o Índice de Plasticidade variou de 28% a 13%. Os solos foram classificados como CH (argila de alta plasticidade) e CL (argila de baixa plasticidade), de acordo com a classificação SUCHS. De acordo com a classificação TRB os solos foram classificados como A-7-5 (argilas) e A-7-6 (argilas).

As amostras coletadas foram classificadas como argilas, no enquadramento da classificação TRB, em sua maior parte como A-7-5. Apenas as amostras 1 e 10 foram classificadas como A-7-6, na classificação SUCHS. As amostras se dividiram entre CH (1, 2, 5, 6, 9, 10) e CL (3, 4, 7,8), em geral as amostras apresentam características semelhantes.

Segundo o DNIT (2006), solos classificados como A-7-5 possuem índice de plasticidade baixo se comparado ao Limite de Liquidez, pois são solos elásticos e expansivos. Já os solos classificados como A-7-6 têm alto índice de plasticidade, se comparado ao limite de liquidez, sendo um solo expansivo.

4.2 Compactação, CBR e DCP

O teor de umidade ótimo das amostras compactadas variou de 28,6% a 33,7%, a densidade aparente seca, dentre todos os pontos compactados, variou de 1,304 g/cm³ a 1.549 g/cm³, valores já esperados para amostras argilosas.

O índice de CBR ou ISC, dentre todos os pontos compactados, variou de 1,8% a 20,2%, o DN, dentre todos os pontos executados, variou de 9,09 mm/golpe até 55,5 mm/ golpe. Vale ressaltar que, como esperado, os resultados de CBR x DCP foram inversamente proporcionais - quanto maior o índice de CBR, menor o valor de mm/golpe. Os gráficos obtidos nos ensaios com DCP apresentaram retas com pouca variação de inclinação, demonstrando a homogeneidade do material compactado nos corpos de prova. Os os pontos compactados no ramo seco, que possuem menor densidade aparente seca, apresentaram maiores valores de CBR e menor penetração (mm/golpe) do DCP, demonstrando uma maior resistência.

Berti e Paiva (2006) salientam que o índice CBR de corpos de prova do ramo úmido, quando submetidos à imersão em água, tendem a não sofrer alterações, porém, o índice CBR dos corpos de prova do ramo seco, quando submersos em água, tendem a baixar.

4.3 Correlação entre CBR e DCP

Segundo Berti (2005), as correlações podem variar de acordo com o método de ensaio, o ângulo da ponteira do DCP e o local onde o ensaio foi executado, sendo em campo ou em laboratório.

A linha de tendência dos pontos é posicionada de acordo com os valores de DCP x CBR, ocorrendo uma correlação. O coeficiente de determinação (R^2) representa a variação de correlação entre os pontos, quanto menor o valor de R^2 , maior é a variação (LIMA, 2000). As linhas de tendência obtidas com a plotagem dos gráficos CBR x DCP, são chamadas de curvas de calibração para cada tipo de solo analisado.

Berti e Paiva (2006) salientam que podem ser utilizados modelo lineares, logarítmicos, exponenciais ou bi-logarítmicos para correlacionar DCP e CBR, sendo que os modelos que apresentam melhores resultados são Log x Log e exponenciais.

A norma norte americana ASTM D6951:2018 - *Standart Test Method for use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*, apresenta algumas correlações para solos classificados de acordo com o Sistema de Classificação Unificado (SUCHS).

Os autores Berti e Paiva (2006) e Fernandes (2015), relacionaram diversas correlações em seus trabalhos, apresentando diversas características, como tipo de solo ensaiado, método de ensaio, inclinação das retas e suas respectivas equações.

Após a análise, foi possível identificar os grupos de solos e suas características, e correlacionar os resultados através de regressão linear. Utilizando o software Excel foi possível plotar os pontos de ensaio, apresentando linhas de tendência, e foi utilizado o modelo bi-logarítmico por apresentar melhor ajuste.

Os valores de log CBR e log DCP dos 50 pares foram utilizados para obtenção dos gráficos de dispersão no modelo linear. Foram executadas diferentes análises de regressão, uma delas contendo todos os pontos ensaiados, conforme apresentado no Gráfico 1. O Gráfico 2 apresenta os pontos de ensaio classificados como A-7-6 e o Gráfico 3 dos pontos classificados como A-7-5. Os grupos identificados segundo a classificação TRB foram priorizados, por ser a classificação mais utilizada dentro das referências aplicadas.

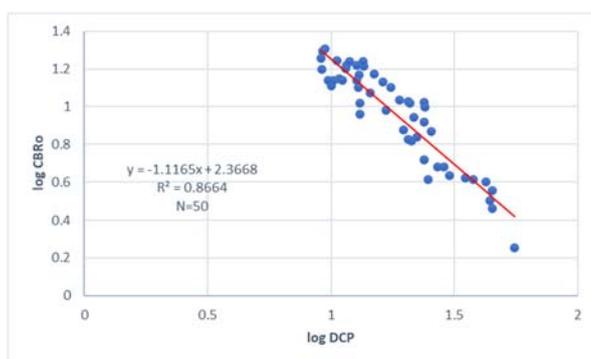


Gráfico 1. Dispersão linear 1, todas as amostras, Autor (2021).

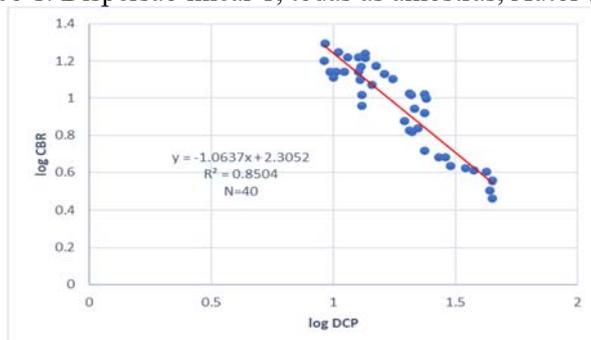


Gráfico 2. Dispersão linear 2, amostras classificadas como A-7-6, Autor (2021).

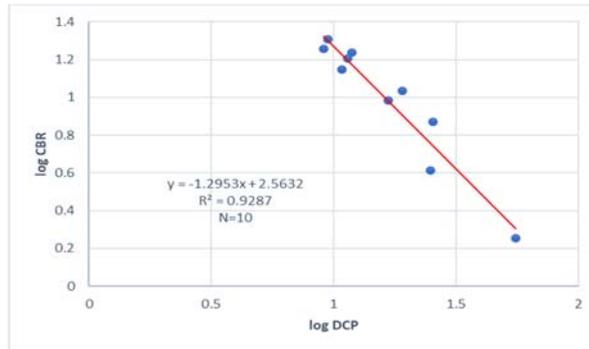


Gráfico 3. Dispersão linear 3, amostras classificadas como A-7-5, Autor (2021).

As correlações obtidas a partir das análises de regressão e suas características estão apresentadas na Tabela 1, em que o índice CBR é dado em porcentagem, DCP em mm/golpe, R^2 é o coeficiente de determinação e a inclinação da reta em graus.

Tabela 1 - Correlações obtidas, autor (2021).

Nº	Amostras	Nº de pontos	Classificação		Equação	R^2	Inclinação	
			TRB	SUCHS			m	grau
1	Todas	50	A-7-5, A-7-6	ML, MH	$\log(\text{CBR}) = 2,367 - 1,117 \cdot \text{Log}(\text{DCP})$	0,866	-1.117	48°
2	A-7-6	10	A-7-6	MH	$\log(\text{CBR}) = 2,563 - 1,295 \cdot \text{Log}(\text{DCP})$	0,928	-1.295	52°
3	A-7-5	40	A-7-5	ML, MH	$\log(\text{CBR}) = 2,305 - 1,064 \cdot \text{Log}(\text{DCP})$	0,85	-1.064	47°

As dispersões lineares apresentadas nos Gráficos 1, 2 e 3 demonstram que existe uma boa correlação entre os índices obtidos. Os valores de R^2 foram elevados, o que indica boa representatividade entre as variáveis. As análises de regressão demonstram que, com o aumento dos valores de CBR (%), os valores de DCP (mm/golpe) diminuem, sendo inversamente proporcionais.

A correlação 1 (Gráfico 1) é semelhante à correlação 3 (Gráfico 3), apresentando um grau de inclinação e R^2 próximos. A correlação 2 (Gráfico 2) apresenta um R^2 mais elevado, assim como um grau de inclinação maior em sua reta. O número de pontos ensaiados nas correlações 1 e 3 é muito maior que na correlação 2, o que pode indicar valores inferiores para coeficientes de determinação (R^2). Acerca disso, Carvalho (2005) observou que o coeficiente de determinação (R^2) diminuiu quando todos os pares foram analisados simultaneamente, salientando que é mais indicado utilizar correlações individuais para cada tipo de solo.

O Gráfico 4 apresenta um comparativo entre as equações obtidas e suas inclinações de reta:

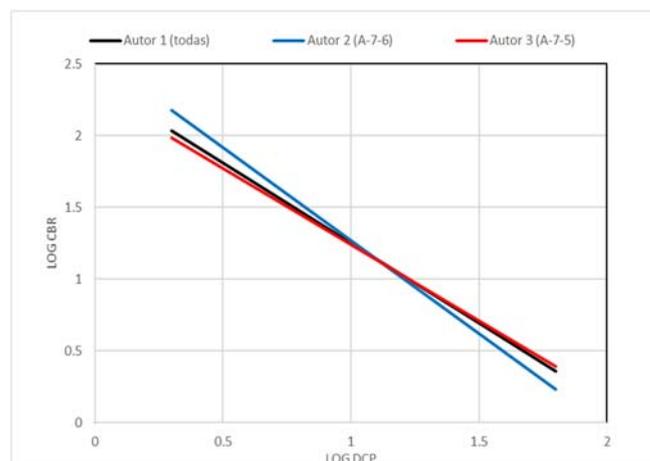


Gráfico 4. Comparativo entre as equações obtidas, Autor (2021).

A equação 2 (A-7-6) apresenta um grau de inclinação maior, indicando que os pontos secos das amostras A-7-6 apresentam índices CBR mais elevados do que os pontos secos das amostras A-7-5, e que os pontos úmidos das amostras A-7-6 apresentaram CBR inferior aos pontos úmidos das amostras A-7-5. Foram selecionadas algumas correlações que possuem semelhanças em termos de execução de ensaios e tipo de solo utilizado (argilosos), conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Correlações existentes utilizadas no comparativo, Autor (2021).

Autor	Tipo de solo	Nº de pontos	R ²	Equação	Inclinação	
					m	grau
Berti (2005)	A-7-5 (argiloso)	33	0.93	$\log(\text{CBR}) = 2,55 - 1,26 \cdot \text{Log}(\text{DCP})$	-1.26	52°
Lima (2000)	A-7 (argiloso)	19	0.941	$\log(\text{CBR}) = 2,241 - 1,091 \cdot \text{Log}(\text{DCP})$	-1.091	47°
Harison (1987)	Argiloso	-	0.97	$\log(\text{CBR}) = 2,56 - 1,16 \cdot \text{Log}(\text{DCP})$	-1.16	49°

As equações de correlação foram plotadas, juntamente com as equações obtidas neste trabalho, para fins de comparação, no Gráfico 5.

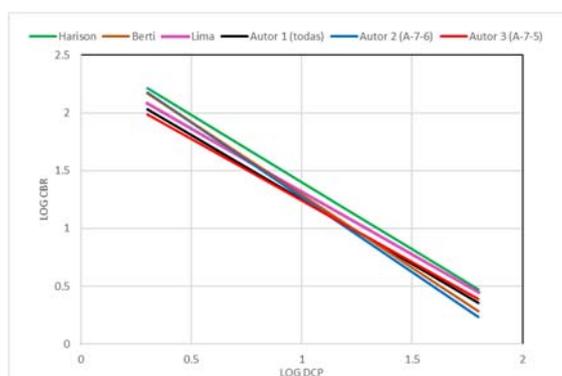


Gráfico 5 - Comparativo entre as equações obtidas e equações existentes, Autor (2021).

A representação gráfica permite identificar a semelhança entre as equações obtidas e as equações dos outros autores. A comparação plotada no Gráfico 5 permite identificar uma paridade entre as equações desenvolvidas por Harison (1987) e Lima (2000). As equações 1 (todas as amostras) e 3 (A-7-5) desenvolvidas neste trabalho, apresentam inclinações semelhantes. A equação proposta por Berti (2005) apresenta um ângulo de inclinação maior, assim como a equação 2 (A-7-6), desenvolvida neste trabalho.

5 CONCLUSÃO

A metodologia empírica utilizada neste trabalho apresentou resultados significativos, tendo sido possível caracterizar as amostras e correlacionar os resultados obtidos nos ensaios CBR e DCP. Os ensaios CBR e DCP foram realizados em corpos de prova não inundados, simulando uma condição de campo, sem que haja saturação do solo. Os corpos de prova do ramo seco apresentaram índices mais elevados, principalmente os pontos de menor umidade, mesmo apresentando menor densidade. Sendo que os pontos próximos à umidade ótima apresentam maior densidade e tendem a apresentar índices de CBR mais elevados. Objetivando uma melhor análise para os ensaios com DCP em campo ou laboratório, são recomendados estudos futuros, analisando a influência da saturação dos corpos de prova sobre os resultados de CBR e DCP.

Conclui-se que as correlações obtidas apresentaram um nível satisfatório, podendo ser utilizadas para correlacionar os resultados de CBR e DCP para solos dos grupos selecionados. Além disso, verifica-se a importância de desenvolvimento de novas correlações para ampliação do banco de dados disponível, o que facilita o uso do equipamento DCP, uma vez que este é de grande utilidade na avaliação da compactação de camadas de solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, A.B.C. (2002) *Avaliação da Capacidade de Suporte e Controle Tecnológico de Execução da Camada Final de Terraplenagem Utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- ASTM International (2018). *ASTM D6951: Standard test method for use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*.
- Berti, C. (2005) *Avaliação da capacidade de suporte de solos “in situ” em obras viárias através do Cone de Penetração Dinâmica: estudo experimental*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Berti, C, Paiva, C.E.L. (2006) *Correlações entre Índices de Penetração DCP e CBR Disponíveis na Literatura*. Trabalho V-031. V Jornada Luso Brasileiras de Pavimentos: Políticos e Tecnologias, Recife.
- Carvalho, R.G. (2005) *Correlações entre os ensaios DCP e CBR para solos saprolíticos de textura fina*. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de Pavimentação*. IPR-719. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.
- Fernandes, R. et al. (2015) *Desenvolvimento de correlação entre os ensaios DCP e CBR: estudo de caso: pista de testes*. Trabalho de conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.
- Harison, J.A. *Correlation Between California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer Strength Measurement of Soils*. In: Proc. Instn. Civ. Engs, Loundom. 1987.
- Lima, L.C. (2000) *O Ensaio DCP Aplicado no Controle de Qualidade de Compactação de Obras Viárias Executadas com Solos Lateríticos de Textura Fina*. Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- Souza, B.M.M., *Estudo de correlação entre os índices de DCP e CBR de solos típicos da cidade de Natal/RN*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.