



USO DO PENETRÔMETRO PORTÁTIL BARRA MINA PARA CONTROLE DE COMPACTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ESPESSURAS DE CAMADAS DE PAVIMENTOS

*Carlla Rafaella Barros de Andrade¹, Bruno Conde Passos², Juliane Andréia Figueiredo Marques³
Samara Kathyanne de Oliveira Meneses⁴, Iany Andrade dos Santos⁵.*

RESUMO: *Em projetos de pavimentação é necessária a execução de ensaios que avalie a capacidade de suporte das camadas de solo compactado constituintes do pavimento, no entanto, são comuns casos em que estes ensaios são negligenciados devido ao custo e tempo de execução dos mesmos. Este trabalho objetiva o desenvolvimento de correlações entre os ensaios “California Bearing Ratio” (CBR) e o penetrômetro portátil Barra Mina (BM) visando a aplicação em pavimentos. O BM é um equipamento que, além de baixo custo de aquisição e operação, permite realizar uma grande quantidade de ensaios e avaliar a estrutura das camadas em profundidade. Para estabelecimento da correlação foram efetuados ensaios em campo e em laboratório, os resultados obtidos indicam que o ensaio de BM apresenta uma correlação significativa com o CBR para o tipo de solo ensaiado, caracterizado como A-2-4. Sendo assim, as equações encontradas podem ser utilizadas para avaliar a capacidade de suporte do solo, realizar controle de compactação e determinar das espessuras das camadas do pavimento.*

PALAVRAS-CHAVE: *Penetrômetro Barra Mina; CBR; Resistência; Pavimentos.*

1. INTRODUÇÃO

É essencial conhecer a capacidade de suporte de um solo compactado que será utilizado em projetos rodoviários para garantir um bom desempenho do pavimento durante sua vida útil. (ANDRADE, 2017). Os processos adotados no controle tecnológico das obras de pavimentação mantêm, atualmente, procedimentos e metodologias convencionais que não fornecem suficientes subsídios técnicos para uma avaliação das propriedades mecânicas das camadas do pavimento e da estrutura como um todo (ALVES, 2002). É essencial, para a qualidade do pavimento, a realização de adequado controle tecnológico na execução de camadas de solo compactadas. Portanto é de extrema importância o estudo e a aplicação de novos métodos que favoreçam o controle de qualidade das obras. A simplicidade e a mobilidade dos penetrômetros permitem realizar uma grande quantidade de ensaios e assim, avaliar melhor a homogeneidade das camadas de aterro, além do fato de

¹ Afiliação: Universidade Federal de Pernambuco – Campus Recife
Email: carlla.rafaella@hotmail.com

² Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus A. C. Simões
Email: bcondepasos@gmail.com

³ Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus A. C. Simões
Email: julianemarques@hotmail.com

⁴ Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus Sertão
Email: samara.kathyanne@gmail.com

⁵ Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus A. C. Simões
Email: ianyandrade@hotmail.com



penetrômetro tipo Barra Mina apresentar baixo custo de aquisição e operação. Por isso, o ensaio BM pode ser utilizado na detecção de anomalias de camadas uma vez construídas, na definição das espessuras das camadas de solos, verificação da eficiência dos equipamentos de compactação utilizados em obra e avaliação de pavimentos existentes. Paiva e Berti (2006) afirmam que os valores resultantes dos ensaios de CBR e com penetrômetros são relacionáveis entre si. Neste sentido, têm sido estabelecidas diversas correlações obtidas por várias entidades no Brasil e em outros países. Estas correlações variam de acordo com o material ensaiado, as condições do ensaio e o tipo de equipamento. Porém, o Barra Mina ainda é pouco difundido no meio rodoviário, há uma escassez de estudos que correlacione o uso do equipamento com o CBR e não existe um método de ensaio padronizado, o que gera dificuldades e falta de sensibilidade na interpretação de seus resultados, para os profissionais do meio rodoviário.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho é utilizado o penetrômetro portátil do tipo Barra Mina de propriedade do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas – LABGEO. O ensaio Barra Mina é executado através da cravação de haste metálicas rígidas de diâmetro de 19mm e 1m de comprimento, que é introduzida ao solo através de golpes do martelo de cravação de 5kg e 35cm de queda livre. Os resultados do ensaio do Barra Mina podem ser analisados através da curva Barra Mina, a qual relaciona o número de golpes acumulado (abscissa) e a profundidade alcançada (ordenada), a inclinação das retas no gráfico indica o índice de penetração (DN) em mm/golpe.

2.1 Metodologia de Campo

O local escolhido para ser estudado é o trecho de aproximadamente 50km da rodovia BR-316, que estava sendo pavimentado quando os ensaios foram realizados, situada entre o povoado Carié na cidade de Canapi – AL e a divisa entre Alagoas e Pernambuco na cidade de Inajá – PE. Os ensaios foram realizados em cinco pontos (estacas 1865, 1867, 1868, 1870 e 1871) do bordo direito do subleito composto por um solo pedregulhoso-areno-siltoso, compactado, solo esse proveniente de empréstimos laterais. Nos pontos citados houve a escavação do terreno, para retirar o solo solto que protegia a camada de regularização do subleito já compactado, e obter uma “caixa” ou poço de inspeção com fundo nivelado, cuja profundidade variou de 5 a 10cm.

Em cada poço de inspeção realizou-se primeiramente o ensaio de penetração com o Barra Mina (Figura 1). Inicialmente é apoiada a base niveladora no solo, que serve para auxiliar na cravação vertical da haste, então inicia-se a cravação com o levantamento do martelo que deve ser feito até o limite do guia e solto em queda livre. Com o auxílio de uma trena é medido quanto da haste ainda não foi penetrado inicialmente e após cada 10 golpes, valor escolhido conforme estudo apresentado em Saskatchewan (1992). A primeira leitura de penetração é sempre desconsiderada, pois, no primeiro golpe, a superfície de contato entre o cone e o solo não é a mesma dos golpes posteriores, face à distribuição de pressões induzida pelo ensaio.



Figura 1: Execução de Ensaio Barra Mina em Campo e Detalhe da Base Niveladora



Fonte: Os Autores (2018).

No Brasil não há normas quanto aos procedimentos do ensaio Barra Mina, então baseou-se na norma americana ASTM D-6951, que regulariza o ensaio com o penetrômetro DCP. E definiu como critério de parada do ensaio se depois de dez golpes, a penetração for inferior a 1 mm ou quando a haste penetra 800mm, pois abaixo dessa profundidade, normalmente o tráfego tem efeito mínimo associado à performance do pavimento. Posteriormente a realização do Barra Mina foi executado o ensaio de Frasco de Areia e a determinação do teor de umidade *in situ* através do equipamento *speedy*. De cada poço de inspeção o solo foi coletado e levado ao laboratório para realização de ensaios.

2.2 Metodologia de Laboratório

Em laboratório, as amostras de solo coletadas foram preparadas para os ensaios de caracterização e classificadas segundo os métodos HRB (Highway Research Board). Para correlacionar o valor do CBR com o índice de penetração (DN) do Barra Mina, aplicou-se a metodologia proposta por Harison (1987), a diferenciar pelo penetrômetro utilizado, que consiste em realizar o ensaio de compactação (norma NBR 7182), moldando-se dois corpos-de-prova, com mesmas características de umidade e compactação. No primeiro corpo-de-prova, realiza-se o ensaio de CBR sem imersão, após, posiciona-se o penetrômetro no centro do orifício produzido pelo ensaio de CBR e realiza-se o ensaio Barra Mina; no segundo, realiza-se os mesmos procedimentos de ensaio do primeiro corpo de prova, porém após imersão de 4 dias. A Figura 2 ilustra a realização dos ensaios de CBR e Barra Mina.

Figura 2: Ensaio CBR e Barra Mina em Laboratório.



Fonte: Os Autores (2018).



Ressalta-se que nesta pesquisa, realizou-se o ensaio do penetrômetro em campo fazendo-se uma leitura de penetração a cada dez golpes, enquanto que em laboratório, devido à pequena altura dos corpos-de-prova, fez-se uma leitura para cada golpe.

Utilizando os resultados dos ensaios CBR e Barra Mina obtidos na campanha experimental, buscou-se ajustar uma correlação entre os indicativos de suporte, baseando-se na metodologia proposta por Alves (2002), através de duas técnicas, gerando dois tipos de correlação: a correlação 1, que relaciona o índice de penetração (DN) com o respectivo valor de CBR, ambos obtidos no mesmo teor de umidade; e a correlação 2, que relaciona o DN sem imersão com o respectivo CBR submerso quatro dias. Esta segunda condição representa o que se passa no campo quando há o controle de execução, isto é, determina-se o DN na condição de umidade “in situ”, mas se quer avaliar o CBR na condição saturada, ou seja, se o CBR obtido está de acordo com o CBR de projeto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo do trecho em estudo, foram ensaiadas um total de 5 amostras e todas foram classificadas segundo HRB como do tipo A-2-4, cujo comportamento como subleito pode variar de excelente a bom. Devido a semelhança entre as amostras, os ensaios de compactação, CBR e Barra Mina foram realizados apenas com a amostra proveniente da estaca 1868. A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de Compactação, CBR e Barra Mina realizados em cada corpo de prova moldado submerso e não submerso. Para cálculo do DN, a primeira e a última leitura foram desprezadas. Observa-se que quanto maior o CBR, menor o índice de penetração.

Tabela 1: Resultados dos Ensaios Barra Mina e CBR, em laboratório.

Solo	Corpo de Prova	Umidade (%)	γ_d (g/cm ³)	DN(mm/golpe)	CBR (%)
A-2-4 (submerso)	1	5,90	1,954	5	15,30
	2	7,93	2,030	3,44	25,00
	3	9,36	2,100	4	18,94
	4	10,28	2,090	5,13	10,24
	5	12,88	1,960	16	3,11
A-2-4 (Não Submerso)	6.1	5,90	1,953	1,70	79,90
	6.2	7,93	2,033	2,10	60,03
	6.3	9,37	2,100	2,63	29,73
	6.4	10,28	2,081	4	24,38
	6.5	12,80	1,959	17	5,11

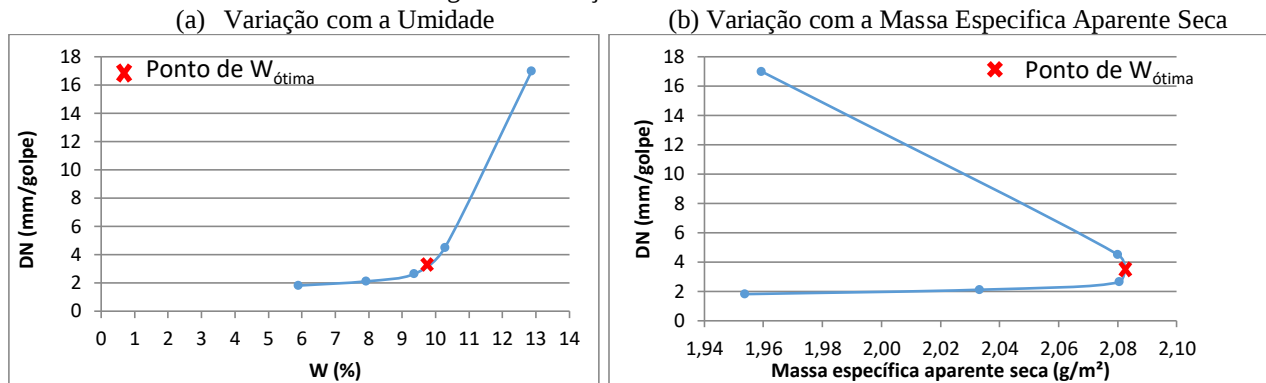
Fonte: Os autores (2018).

3.1 Variação do DN com o teor de umidade e com a massa específica aparente seca

A Figura 3 apresenta a variação do DN com o teor de umidade e com a massa específica aparente seca. Todos os dados foram obtidos nos corpos-de-prova durante o ensaio de compactação, antes da imersão.



Figura 3: Variação do DN com Índices Físicos

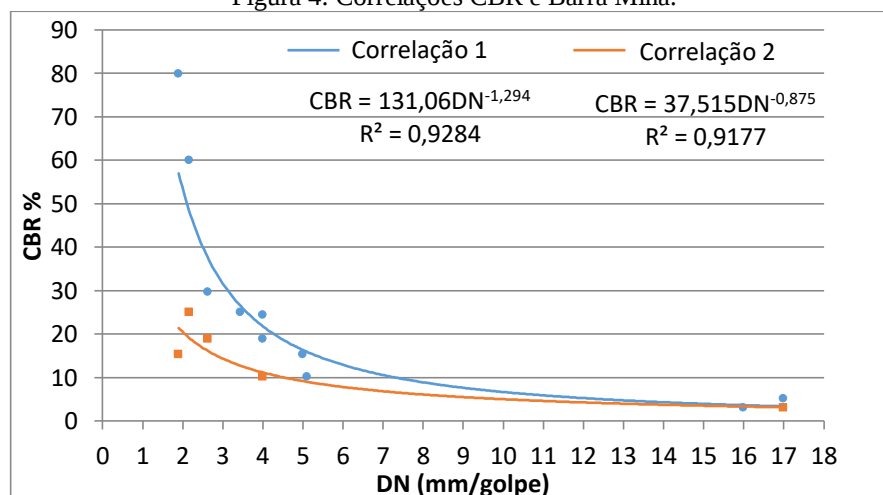


Observa-se, através do Figura 3(a) que, para o solo estudado, no ponto abaixo da umidade ótima (ramo seco), os valores de DN tendem a um valor quase constante. Isto indicaria, então, que se o solo estiver com teor de umidade abaixo da ótima (9,4%; e $\gamma_{\text{máx}} = 2,091 \text{ g/cm}^3$), o DN obtido não será capaz de avaliar se o material estaria ou não com o grau de compactação aceitável. Contudo, há um ponto de inflexão, acima do qual, a capacidade de suporte decresce bruscamente, observado pelo crescimento do valor DN, este ponto de inflexão corresponde ao ponto de teor de umidade ótima. Analisando a Figura 3(b) nota-se que os pontos abaixo da umidade ótima tendem a um valor constante de DN, em torno de 2,0mm/golpe, deste modo, ao se fixar um DN a ser controlado no campo, caso o valor obtido no campo for maior que o fixado, indicaria má compactação, porém se a umidade for baixa, poder-se-ia estar aceitando uma compactação com problemas.

3.2 Correlação do ensaio Barra Mina com CBR

O meio utilizado para correlacionar o Índice de penetração do Barra Mina com o valor CBR foi estabelecido através de análise de regressão linear (método dos mínimos quadrados), com o modelo em forma de potência, sendo possível calcular o coeficiente de correlação R^2 e determinar a equação de regressão. As correlações geradas estão apresentadas na Figura 4 e nas equações Equação 01 e Equação 02.

Figura 4: Correlações CBR e Barra Mina.



Fonte: Os autores (2018).



$$CBR = 131,06DN^{-1,294} \quad (\text{Equação 01})$$

$$CBR = 37,52DN^{-0,875} \quad (\text{Equação 02})$$

Sendo:

$DN \rightarrow$ índice de penetração (Barra Mina).

Os modelos apresentaram um bom índice de correlação, e para valores de DN maiores que 17 mm/golpe, os valores de CBR obtidos, com ambas as correlações, tendem ser os mesmos. A curva da correlação 2 (Equação 02) fornece o CBR de projeto, que é o valor do CBR obtido em laboratório após a imersão do corpo-de-prova por 4 dias, para ser utilizado no dimensionamento do pavimento. A curva da correlação 1 (Equação 01) fornece o CBR “in situ”, que é o valor do CBR na umidade de campo, sem saturação. Com as duas equações pode-se analisar o quanto a camada perde de capacidade de suporte quando saturada. Exemplificando ao realizar o ensaio Barra Mina em uma camada composta por material do grupo A-2-4, ao aplicar 10 golpes e a lança alcançar uma profundidade de 21 mm, considerando que esta camada se encontre no teor de umidade ótima, ela apresentará uma capacidade de suporte “in situ” de 50% (Equação 01). Por outro lado, a mesma camada quando saturada, terá sua capacidade de suporte reduzida para 20% (Equação 02). Isto representa uma queda de 60% da capacidade de suporte da camada.

3.3 Resultados dos ensaios *in situ*

Nas estacas onde foram abertos poços de inspeção realizaram-se os ensaios de Barra Mina e os procedimentos que determinam a massa específica aparente e o teor de umidade. Dessa forma, em campo foram obtidas as propriedades do solo no estado natural. Tais propriedades foram avaliadas com a realização dos ensaios “in situ” e apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados dos Ensaios Barra Mina e CBR, em laboratório

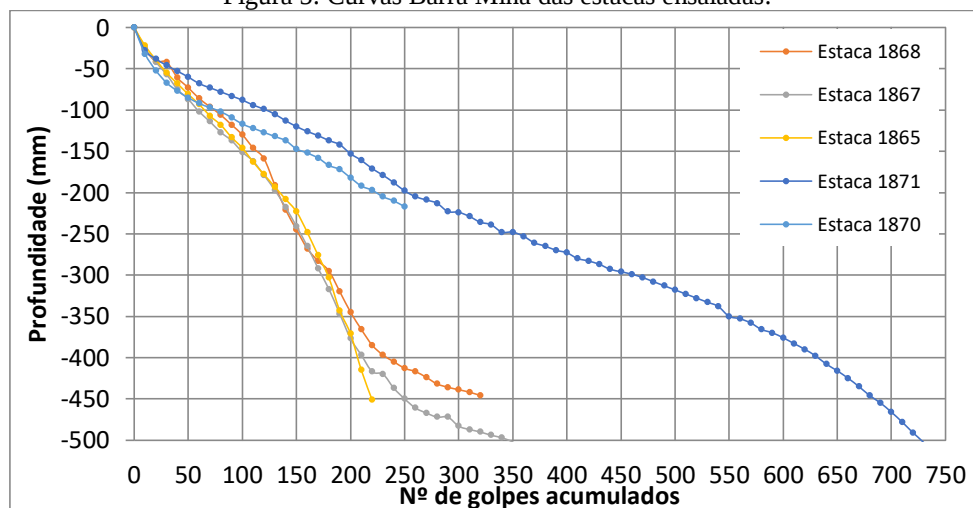
Estaca	DN (mm/golpe)	γ_s (g/cm ³)	Umidade (%)	GC (%)
1865	1,61	1,859	6,55	88,94
1867	1,66	1,855	6,90	88,75
1868	1,37	1,864	7,35	89,18
1870	0,81	1,915	5,40	91,62
1871	0,91	1,903	3,20	91,05

Fonte: Os autores (2018).

O DN é calculado considerando os resultados até uma penetração de aproximadamente 20 cm pois os dados de massa específica aparente seca e teor de umidade são resultantes dos ensaios realizados até essa profundidade. A variação entre os valores de DN encontrados foi ocasionada devido ao fato das condições de campo estarem, relativamente, diferentes em cada poço de inspeção ensaiado, cuja Massa Específica Aparente Seca e Teor de Umidade também se encontravam com valores diferentes, o que determinou a variação do Grau de Compactação e consequentemente a mudança de resistência em cada poço. A Figura 5 apresenta as curvas Barra Mina dos poços de inspeção. A variação da resistência do solo é refletida pela mudança na inclinação da reta, na qual quanto mais horizontalizada, maior o DN e, mais verticalizada, menor será este valor.



Figura 5: Curvas Barra Mina das estacas ensaiadas.



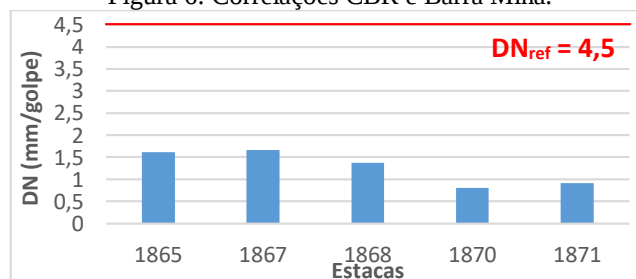
Fonte: Os autores (2018).

Observa-se que nas estacas 1865 e 1867 a camada apresenta maior grau de compactação até a profundidade de 210 mm, pois nesse trecho a curva tem maior inclinação, isso pode ser causado pelo tráfego de veículos que acaba compactando a parte superior da camada, na estaca 1867 na região intermediária (entre 210 e 400mm) nota-se que teve uma diminuição no grau de compactação que volta a aumentar após os 400mm de profundidade. O mesmo acontece para estaca 1868 que demonstra um maior grau de compactação até a profundidade de 150mm, na região entre 150 e 400mm nota-se que teve uma diminuição que volta a aumentar após os 400mm de profundidade. A curva da estaca 1870, indica uma homogeneidade de compactação até a profundidade de 400mm, após há uma diminuição no grau de compactação. Já na estaca 1871, observa-se que a parte superior da camada (até 75mm) apresenta um menor grau de compactação, diferente do restante da camada que demonstra uma maior homogeneidade na compactação.

3.4 Aplicação dos resultados para verificação da compactação da camada no trecho estudado

Através do CBR de projeto, igual a 10% para o trecho do subleito estudado, é definido o Índice de Penetração de Referência (DNref), através da Equação 02 gerada pela correlação 2 (CBR submerso com DN não submerso) que é 4,5 mm/golpe, e deve ser controlado no campo durante o processo executivo. Partindo do pressuposto que a umidade da camada gira em torno da ótima e comparando o DNref com o DN dos poços de inspeção (Figura 6) verifica-se que todos os pontos estão abaixo do DNref, mostrando que a camada sofreu uma eficiente compactação e pode ser aprovada.

Figura 6: Correlações CBR e Barra Mina.



Fonte: Os autores (2018).



Conforme relatado anteriormente, se o solo estiver com teor de umidade abaixo da ótima, o DN obtido não será capaz de avaliar se o material estaria ou não com o grau de compactação aceitável. Então a determinação do teor de umidade em campo é de grande importância.

4. CONCLUSÕES

O trabalho apresenta correlações entre os ensaios BM e CBR, que poderão servir de apoio para avaliação das propriedades mecânicas em locais onde presenciam o tipo de solo estudado, classificado como A-2-4, com aplicação em controle de execução de camadas de aterro e capacidade de suporte de subleito de rodovias. Foram realizadas análises da variação do DN com a massa específica aparente seca e o teor de umidade do solo ensaiado, que foi de grande importância para observar a variação destes índices físicos durante o ensaio BM. Principalmente em detectar que o DN tem pouca variação abaixo da umidade ótima. Dentre as características do Penetrômetro Barra Mina e a viabilidade de seu uso, pode-se concluir que é um equipamento com vasta aplicação, pode ser usado na verificação da eficiência de máquinas de compactação, entre outros. Os ensaios são rápidos e praticamente não destrutivos, o equipamento é versátil, de fácil manuseio, pode ser utilizado tanto “in situ” em vias não-pavimentadas quanto em laboratório em amostras de solo moldadas em cilindro. Além disso, o método pode controlar a qualidade de compactação, inclusive verificando camadas inferiores, sem a necessidade de destruir as superiores, medir a resistência do subleito ou das camadas do pavimento, conduzindo para a avaliação e reabilitação do pavimento, e/ou ainda avaliar as propriedades durante a fase da construção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 185 p. 2002
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-6951: *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*. EUA. 7 p. 2013.
- ANDRADE, C.R.B. “*Análise de Estudos de Ensaios Barra Mina e CBR Visando Aplicações em Pavimentos*”, Monografia de Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas. p.149. 2017.
- HARISON, J. A. “*Correlation Between California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer Strength Measurement of Soil*”. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. London, n.2. 1987.
- PAIVA, C. E. L.; BERTI, C. “*Correlações: Índices de Penetração DCP e CBR Disponíveis na Literatura*”. In: Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias, Recife, JLBP, 2006. v. 5. Anais V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias, 12p.2006.
- SANTOS FILHO, J. M. S. M. “*Investigação Geotécnica – Obtenção de Parâmetros de Projeto Utilizando um Penetrômetro Portátil*”. Monografia de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 91 p. 2011.
- SASKATCHEWAN HIGHWAYS AND TRANSPORTATION. STP 240-20: *Standard Test Procedures Manual*. Canadá, 9p. 1992.