



ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO RESÍDUO DE FELDSPATO PARA UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO

Jonatas Kennedy Silva de Medeiros*, Larissa Santana Batista, Thayse Bezerra da Silva, Adla Jamilly Vieira Felipe, Wily Santos Machado.

* Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar – CCTA, Campus Pombal-Pb. E-mail: jonataskennedy@hotmail.com

RESUMO

A indústria mineradora se destaca pela contribuição significativa com a economia do Brasil, no entanto, possui um baixo índice de desenvolvimento sustentável quando comparado a outros setores, pois produz uma grande quantidade de resíduos que estão dispostos de forma inadequada, provocando uma série de impactos ambientais e possíveis danos à saúde. Dentre os resíduos da mineração, pode-se mencionar os provenientes do beneficiamento do feldspato. Devido à crescente preocupação com a questão ambiental, as indústrias buscam alternativas para diminuir as consequências negativas provocadas no ambiente e aumentar a credibilidade diante do consumidor. Surge então, a possibilidade de incorporação desse resíduo como novo produto ou componente para diversos fins, como por exemplo, a pavimentação. Nessa perspectiva, este trabalho teve por objetivo estudar as propriedades do resíduo com base na mecânica dos solos e dos pavimentos, verificando suas prováveis utilizações como material alternativo na pavimentação. Para tanto, efetuou-se a caracterização física dos resíduos através dos ensaios de granulometria, limite de liquidez e de plasticidade. Por sua vez, a caracterização mecânica se deu através do ensaio de *California bearing ratio*. Os resultados demonstraram que o resíduo possui areia como maior fração granulométrica. Conclui-se que, o resíduo de feldspato pode ser aplicado em camadas como reforço de subleito e sub-base, colaborando assim, para a redução das pilhas de rejeitos e desenvolvimento de um setor sustentável com opções de materiais alternativos.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação, resíduo, materiais alternativos, impacto ambiental.

ABSTRACT

The mining industry stands out for its significant contribution to the Brazilian economy, however, it has a low index of sustainable development when compared to other sectors, because it produces a large amount of waste that is disposed of inappropriately, causing a series of environmental impacts and possible damage to health. Among the mining residues, we can mention those from the processing of feldspar. Due to the growing concern with the environmental issue, industries are seeking alternatives to reduce the negative consequences caused to the environment and increase their credibility with the consumer. The possibility of incorporating this waste as a new product or component for various purposes, such as paving, arises. In this perspective, this work aimed to study the properties of the residue based on soil and sidewalk mechanics, verifying its probable uses as an alternative material in paving. To this end, the physical characterization of the waste was performed through particle size, liquidity limit, and plasticity tests. In turn, the mechanical characterization was done through the California bearing ratio test. The results showed that the residue has sand as the largest particle size fraction. It is concluded that the feldspar waste can be applied in layers as subgrade and sub-base reinforcement, thus contributing to the reduction of waste piles and development of a sustainable sector with options for alternative materials.

KEY WORDS: Paving, waste, alternative materials, environmental impact.

INTRODUÇÃO

O setor da mineração contribui significativamente na economia do Brasil, tendo em vista que, está entre os maiores setores de produção, colaborando de forma notável para a geração de empregos, equilíbrio econômico e avanço da tecnologia. Por outro lado, a indústria mineradora também se destaca pela quantidade de resíduos que são produzidos em decorrência dos processos utilizados para extração e beneficiamento dos minerais.

Dentre esses resíduos pode-se encontrar aqueles provenientes do feldspato, que pertence ao grupo de silicatos de alumínio com potássio, sódio, cálcio e mais raramente bário, sendo que o primeiro tem grande aplicação na indústria da cerâmica e do vidro (RAMOS, 2001). De acordo com Kauffman e Van Dyk (1994), o resíduo de feldspato pode ser usado também como carga funcional e extensor nas indústrias de tinta, plástico e borracha. Para tanto, os autores ressaltam que não se trata de um uso tradicional, porém tem mostrado que, com o uso desse mineral, é possível melhorar o desempenho desses produtos.



Apesar de a indústria mineradora contribuir substancialmente para a economia do país, comparando-se a outras, ainda possui um baixo índice de desenvolvimento sustentável, revelando a elevada necessidade de avaliar suas relações com o meio ambiente e adotar medidas mitigadoras dos impactos causados por essa atividade, fazendo-se necessários estudos de viabilidade de ordem técnica, econômica e ambiental (SOUZA et al., 2018).

Paralelo a isso, o elevado tráfego nas rodovias provoca, de forma mais significativa o seu crescimento. Portanto, acompanhando a essa expansão, surge uma maior demanda pelo consumo de grande parte dos recursos naturais, pois os mesmos podem reduzir altos custos dos materiais utilizados na pavimentação e os elevados impactos ambientais, sobretudo na busca por materiais alternativos que possam ser utilizados como subleito ou reforço de subleito, camadas de base e sub-base do pavimento.

OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo demonstrar os estudos de características físicas e mecânica realizados para a utilização do resíduo de feldspato como material alternativo na pavimentação.

METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos estabelecidos nesse trabalho adotaram-se metodologias e orientações presentes na literatura. Os ensaios realizados seguiram as recomendações das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), além de contribuições pertinentes contidas em dissertações, teses, livros e artigos científicos.

A seguir está exposto na tabela 1 os ensaios realizados de acordo com a ABNT para a realização da pesquisa.

Tabela 1 - Ensaios realizados para caracterização do resíduo de mineração com suas normas correspondentes.
Fonte: ABNT.

Ensaios	Normas
Granulometria	ABNT - NBR 7181/2018
Determinação do Limite de Liquidez	ABNT - NBR 6459/2017
Determinação do Limite de Plasticidade	ABNT - NBR 7180/2016
Determinação do Índice de Suporte Califórnia	DNIT – ME 172/2016

Ensaios de Caracterização Física

As amostras dos resíduos de mineração estudados foram preparadas conforme as orientações da ABNT NBR 6457/1986: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Após a preparação dos materiais, realizou-se os ensaios de granulometria e limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade).

Granulometria

Para a execução do ensaio de granulometria utilizou-se cerca de 1,5 kg de cada amostra, em que passou-se essa quantidade na peneira ABNT nº 10, depois lavou-se o que foi retido, com o objetivo de eliminar o material fino e secou-se em estufa até constância da massa. Com esse material, realizou-se o peneiramento grosso através das peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5 e 4,8 mm de abertura.

Do material passante na peneira ABNT nº 10, tomou-se 120g para a sedimentação e o peneiramento fino. Nesta pesquisa, a etapa de sedimentação foi realizada somente com uso de defloculante, em que a amostra é dispersa na mistura de hexametáfosfato de sódio e água destilada. Seguiu-se todo o procedimento recomendado pela ABNT NBR 7181/2018 efetuando-se as leituras do densímetro correspondentes aos tempos de sedimentação de 0,5, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, e 1, 2, 4, 8 e 24 horas.

Após a realização da última leitura, verteu-se o material da proveta na peneira de 0,075 mm, depois efetuou-se a lavagem, secou-se a fração retida nessa peneira em estufa e realizou-se o peneiramento fino passando o material nas peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0,075 mm.



Por fim, efetuou-se os cálculos necessários para obtenção das porcentagens retidas e acumuladas em cada peneira. Com isso, elaborou-se a curva granulométrica correspondente de cada resíduo, onde nas abscissas estão os diâmetros das partículas, em escala logarítmica, e nas ordenadas as porcentagens das partículas inferiores aos diâmetros considerados, em escala aritmética.

Limite de Liquidez

O ensaio propõe utilizar cerca de 100g de material passante na peneira de 0,42 mm. A amostra é colocada na cápsula de porcelana, adiciona-se água destilada em pequenas proporções, amassando continuamente até formar uma massa plástica.

Depois, transfere-se parte da mistura para a concha, realiza-se uma ranhura na parte central e golpeia-a contra a base, deixando-a cair livremente ao girar a manivela. Posteriormente, anota-se o número de golpes necessário para que as bordas inferiores da ranhura se juntem com aproximadamente 13 mm de comprimento. Em seguida, transfere-se uma pequena quantidade das bordas que se uniram e determina-se a umidade.

Por fim, repete-se as operações até conseguir, no mínimo, mais três pontos que estejam no intervalo de 35 a 15 golpes. Com os dados obtidos, constrói-se um gráfico em que nas ordenadas insere-se o número de golpes, com escala logarítmica, e nas abscissas, o teor de umidade correspondente, em escala aritmética. Para atingir o valor do LL ajusta-se uma reta pelos pontos adquiridos e obtém-se o teor de umidade correspondente a 25 golpes.

De acordo com a ABNT NBR 6459/2017, na impossibilidade de se conseguir a abertura da ranhura ou o seu fechamento com mais de 25 golpes, considerar a amostra como não apresentando limite de liquidez.

Limite de Plasticidade

O procedimento desse ensaio se dá de maneira igual ao ensaio de Limite de Liquidez. Após essa etapa, toma-se cerca de 10g da amostra devidamente preparada e forma-se uma pequena bola, que deve ser rolada sobre a placa de vidro, até formar um cilindro com pressão suficiente da palma da mão. Em seguida, determina-se o teor de umidade quando o cilindro fragmentar e possuir dimensões de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento.

Ensaio de Caracterização Mecânica

Determinação do California Bearing Ratio

Iniciando os procedimentos do ensaio, realizou-se a moldagem, na umidade ótima, de um corpo de prova por resíduo, sendo eles colocados em imersão durante quatro dias em um balde cheio de água. Ao longo desse período acompanhou-se o nível de expansão das amostras.

Os corpos de prova moldados foram utilizados no ensaio de expansão e penetração. Para o primeiro ensaio, adaptou-se um extensômetro na haste que foi colocado na borda superior do cilindro, com o objetivo de medir as expansões ocorridas durante os 4 dias. Após o período de embebição, preparou-se o corpo de prova para o ensaio de penetração, retirando cada molde com o corpo de prova da imersão e deixando escoar a água por 15 minutos.

Passado o tempo de espera do escoamento da água, fez-se a penetração através do puncionamento na face superior da amostra por um pistão com diâmetro aproximado de 50 mm, com a velocidade de 1,27 mm/min. As leituras obtidas no extensômetro do anel em função da penetração do pistão no resíduo e do tempo foram anotadas a fim de se obter uma curva pressão-penetração.

E ao final desses ensaios os dados obtidos foram utilizados para efetuar os cálculos da expansão e do CBR pelas equações 1 e 2, respectivamente, como também do Índice de Suporte (IS) pela equação 3.

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{\text{leitura final} - \text{leitura inicial no extensômetro}}{\text{altura inicial do corpo de prova}} \times 100 \quad \text{equação (1)}$$

$$\text{CBR (\%)} = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad \text{equação (2)}$$

$$\text{IS} = \frac{\text{CBR} + \text{CBR}_{IG}}{2} \quad \text{equação (3)}$$



RESULTADOS

Granulometria

A partir dos dados dos ensaios de peneiramento e sedimentação, elaborou-se a curva granulométrica do resíduo de feldspato, conforme exibido na figura 1, no qual se observou uma maior uniformidade.

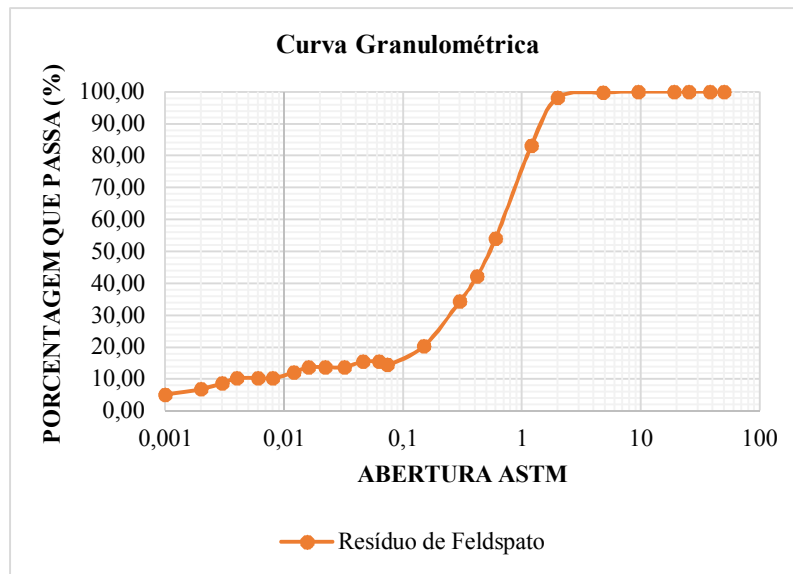


Figura 1: Curva granulométrica do resíduo de feldspato. Fonte: Autor, 2019.

Os parâmetros de diâmetro efetivo (D_{10}), coeficiente de uniformidade (C_u) e coeficiente de curvatura (C_c) referentes ao resíduo, foram extraídos da figura 1 e estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros determinados para o resíduo.

Fonte: Autor, 2019.

Resíduo	Diâmetro efetivo (D_{10})	Coeficiente de uniformidade (C_u)	Coeficiente de curvatura (C_c)
Feldspato	0,004	175	22,32

Na análise dos dados obtidos através da curva granulométrica do resíduo, o coeficiente de uniformidade apresentou $C_u > 15$, revelando uma desuniformidade nos grãos, característica positiva para abordagem na mecânica dos solos e dos pavimentos. Já o seu diâmetro efetivo, apresentou um valor inferior ao que pode ser considerado, nesse sentido, espera-se que a água possua maior dificuldade de se movimentar entre as partículas do resíduo de feldspato.

Embora o resíduo de feldspato tenha apresentado um C_c superior a 3, seu valor de coeficiente de uniformidade foi bem elevado. Knappett e Craig (2016) apontam que quanto maior o valor do coeficiente de uniformidade, maior o intervalo de tamanho das partículas do solo. Portanto, a granulometria do resíduo de feldspato contribui para este estudo, tendo em vista que a distribuição dos grãos apresentou ampla faixa de tamanho de partículas (Tabela 3), segundo a ABNT.

Tabela 3 - Composição granulométrica segundo ABNT

Fonte: Autor, 2019.

Granulometria (mm)	Resíduo de Feldspato (%)
Pedregulho ($4,8 < \phi < 7,6$)	0,25
Areia grossa ($2 < \phi < 4,8$)	1,62
Areia média ($0,42 < \phi < 2$)	55,85
Areia fina ($0,05 < \phi < 0,42$)	27,98
Silte ($0,005 < \phi < 0,05$)	4,3

Observou-se que o resíduo de feldspato possui em sua constituição uma grande proporção de areia, sendo composto por 85,45% de partículas dentro dessa faixa granulométrica.

Apesar do resíduo estudado ter areia em maior porcentagem, ainda há presença de finos ($\phi < 0,074$), ou seja, 10% de frações correspondentes ao tamanho de argila em sua composição, ocupando os espaços vazios deixados pelos maiores, melhorando as suas condições de compactação e de resistência.

A fim de enquadrar o resíduo em uma das faixas granulométricas propostas pela norma do DNIT ES 141/2010, para materiais utilizados em bases granulares, elaborou-se a figura 2, que estabelece a curva granulométrica do resíduo com os limites da faixa F ($N < 5 \times 10^6$), tendo em vista que essa foi a classificação mais aproximada para a granulometria do mesmo.

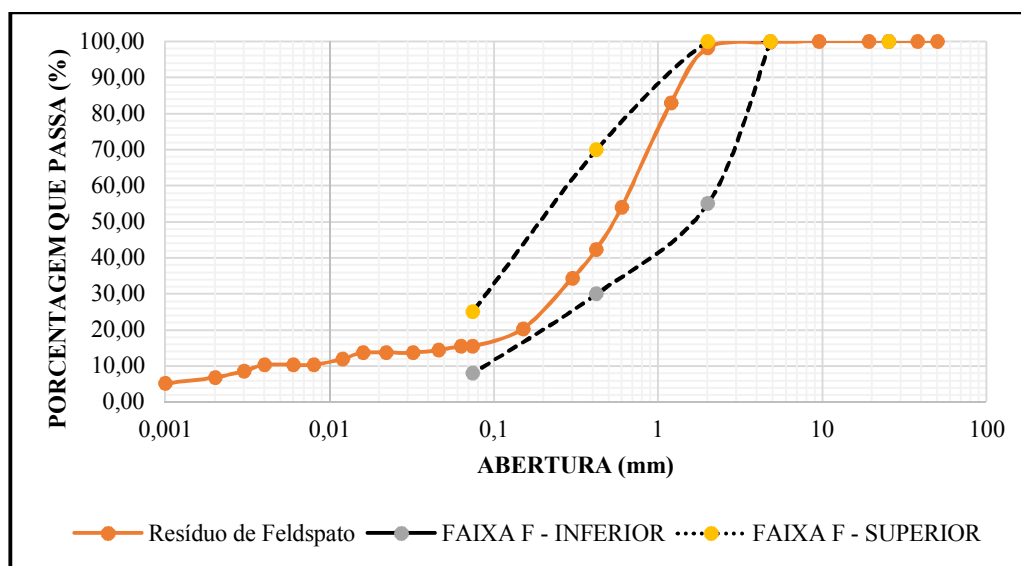


Figura 1 - Curva granulométrica do resíduo com limites da faixa F. Fonte: Autor, 2019.

Verificou-se a partir da figura 2, que o resíduo de feldspato pode ser utilizado de forma direta como material de base granular para a faixa F do DNIT. No entanto, somente a composição granulométrica deste resíduo não é suficiente para confirmar a sua aplicação como material para camada de base dos pavimentos, tornando-se necessário avaliar mais parâmetros.

Limites de Atterberg

Ao realizar os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade para verificar a influência das frações finas do resíduo, notou-se que o mesmo não apresentou características plásticas e/ou líquidas, tendo em vista que a maior fração dos grãos corresponde a areia, conforme analisado através da curva granulométrica.

A partir dos resultados da granulometria e dos limites de Atterberg, tornou-se possível classificá-lo. Conforme propõe a metodologia da AASHTO e da SUCS, mostrado na tabela 4 abaixo. Em relação a classificação proposta pelo SUCS, o seu material corresponde a 50% ou mais da fração grossa passando na peneira ABNT nº 4 com mais de 12% de finos.

Tabela 4 - Classificação do resíduo segundo metodologia da AASHTO e SUCS.
Fonte: Autor, 2019.

Classificação	Resíduo de feldspato
AASHTO	A-1-b
SUCS	SM



Material constituinte	Areia/areia siltosa
Qualidade como subleito	Excelente a boa

Nesse ensaio, o IG do resíduo encontrado foi igual a zero. A qualidade de desempenho do solo como material de subleito é inversamente proporcional ao índice de grupo, logo, o resíduo de feldspato demonstrou através desse índice valores ótimos como capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento.

Para avaliar as características principais e comportamentos do solo de cada grupo e subgrupo, foram considerados os limites de Atterberg. Senço (2007) afirma que os solos classificados no grupo A-1, são constituídos de material graúdo, possuindo ligante de baixa plasticidade e, sobretudo, no subgrupo A-1-b predomina a areia média, bem graduada, podendo apresentar ou não ligante, confirmando a classificação para o resíduo de feldspato.

Dessa forma, a análise da influência dos limites de Atterberg nas características do resíduo para aplicação na pavimentação é importante, haja vista a afirmação de Lambe e Whitman (1969) em que frequentemente utilizam-se esses limites diretamente nas especificações para controle de solo para uso em aterro e em métodos semiempíricos de projeto.

California Bearing Ratio

O resultado do CBR do resíduo estudado está exibido na Figura 3.

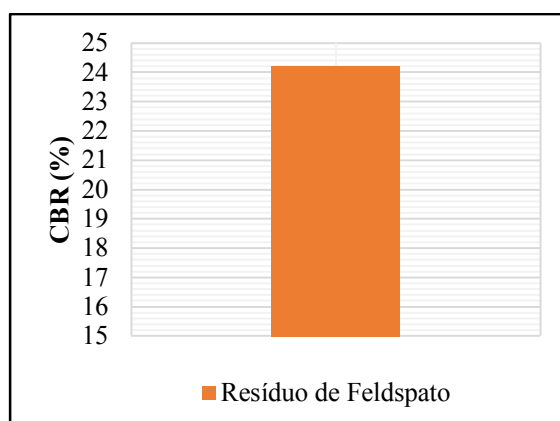


Figura 3 - Valor de CBR do resíduo de Feldspato. Fonte: Autor, 2019.

Foi encontrado o valor de CBR do resíduo de feldspato igual a 24,21%. De acordo com as Classificações de solos de HRB e do CBR, da AASHTO, e a Classificação Unificada de Solos, vê-se que o resíduo de feldspato (subgrupo A-1-b) pode exibir CBR mais provável entre 20 e 80%. Além de que, o resíduo pode expor resultados de CBR na faixa de 10% a 40%, tendo em vista que foi sua classificação pelo Sistema Unificado como SM.

Quanto aos valores de expansão, o resíduo de feldspato demonstrou uma expansão de 0,03%. Ao analisar a expansão, Silva (2015) expressa que sua ocorrência é função da mineralogia, da estrutura e da textura do solo.

Nesse sentido, verificou-se que o resíduo de feldspato, não possui CBR suficiente para aplicação na camada de base, porém, pode ser empregado como material de sub-base, reforço do subleito e subleito de pavimentos, pois se enquadra nas especificações preconizadas pelo Manual de Pavimentação do DNIT, para esses parâmetros, correspondendo também às afirmações de Senço (2007) que evidencia a importância dos resultados de CBR como umas das características mais aceitas para avaliar o comportamento de um solo, quer como fundação de pavimento, quer como componente das camadas desse pavimento.

CONCLUSÃO

A realização dos ensaios de caracterização física e mecânica, possibilitaram o conhecimento dos constituintes e das propriedades do resíduo de feldspato, obtendo maior clareza quanto à possível aplicação desse material nas camadas dos pavimentos.



O resíduo de feldspato foi classificado segundo o SUCS como SM e conforme a metodologia da AASHTO como integrante do grupo A-1-b, possuindo $IG=0$ e comportamento como subleito de excelente a bom. Demonstrando $Cu>15$, com um intervalo maior de tamanho das partículas.

Com base no valor de CBR e expansão, é permitido utilizar o resíduo, segundo as exigências do DNIT, como material constituinte das camadas de reforço de subleito e sub-base, além de empregá-lo como o próprio subleito dos pavimentos, porém, para aplicá-lo como material de base, o valor de CBR não é suficiente.

Desse modo, verifica-se ao final do estudo, a viabilidade técnica de utilizar o resíduo de mineração como material constituinte das camadas de reforço de subleito e sub-base, entretanto, são necessários mais ensaios para que o resíduo demonstre um melhor comportamento mecânico em seu desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RAMOS, Leonardo José. **Balanco Mineral Brasileiro**. 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-feldspato>>. Acesso em: 03 fev. 2019.
2. KAUFFMAN, R. A., VAN DYK, D. **Feldspars**. In: Industrial Mineral and Rocks, Donald D. Carr, Senior Editor, 6th Edition, SMME, Littleton, Colorado, 1994, p. 473-481.
3. SOUZA, Marcondes Mendes de et al. Estudo do comportamento térmico e absorção de água em revestimento cerâmico, utilizando na formulação da massa: argila, quartzo, feldspato e resíduos do beneficiamento do caulim. In: Congresso sul-americano de resíduos sólidos e sustentabilidade, 1, 2018, Gramado. **Anais...**. Gramado: IBEAS, 2018. v. 1, p. 1 - 5.
4. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006. 274 p.
5. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3080**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. EUA, 2004. 7 p.
6. _____. **ME 172**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Brasília, 2016. 17 p.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____. **NBR 6459**: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017. 6 p.
8. _____. **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3 p.
9. _____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.
10. _____. **NBR 6457**: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.
12. KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F.. **Craig Mecânica dos Solos**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016. 419 p.
13. SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2007. 1 v.
14. LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V.. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969. 548 p.
15. SILVA, Albaniza Maria da. **Estudo de parâmetros de compactação proctor no comportamento mecânico do solo**. 2015. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015