

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM CAL HIDRATADA NO SERTÃO PARAIBANO

Danielle Leal Barros Gomes

danihlbg@gmail.com

Túlio Henrique Gomes

tulio_henrique_g@gmail.com

Maria Rayanne Oliveira de Araújo Gonçalves

rayanaraujo@hotmail.com

Saul Barbosa Guedes

saulbguedes@yahoo.com.br

Resumo

O estudo da mecânica dos solos é de suma importância para a engenharia geotécnica, pois é a partir disso que será definido qual caminho tomar para elaboração de projetos seguros e eficientes, já que o solo pode limitar o uso do terreno. Além do mais, a falta de estudos geotécnicos, pode trazer sérios problemas para a obra, além de gerar mais despesas e desperdício de materiais. Neste trabalho, fez-se uma análise de caracterização geotécnica do solo do município de Sousa-PB, assim, como a influência da utilização da cal hidratada, como material estabilizante para solos. Para a verificação da mistura solo-cal, foram adotados os teores de 2,0, 4,0, 6,0, 8,0 e 10,0% de cal em relação ao peso seco, bem como duas energias de compactação, para cura de 7 e 14 dias. Após a análise de caracterização geotécnica, o solo local foi classificado como uma argila siltosa, pertencente ao grupo A-7-6 e apresenta baixa compressibilidade. A cal hidratada, utilizada para estabilização do solo, mostrou-se eficaz e apresentou bons resultados, em relação a melhora da granulometria, plasticidade e resistência. Houve casos onde corpos de prova superaram a resistência mínima preestabelecida de 2,1MPa.

Palavras-chave: Material Estabilizante, Mistura solo-cal, Resistência.

1. Introdução

O crescimento populacional e a urbanização, associados à falta de moradia em muitos locais, são os principais fatores que levam à ocupação irregular e desordenada do solo. Diante desta perspectiva, a Mecânica dos Solos tem grande importância, pois estuda o comportamento dos mais variados solos, dando suporte para que engenharia geotécnica possa desenvolver e executar projetos de maneira segura, mesmo em locais desfavoráveis.

Para a construção civil, realizar estudos com o intuito de conhecer o solo da região onde será implantada a obra é imprescindível. Pois sabe-se que o solo, é um material que pode limitar o uso do terreno. O conhecimento do relevo local e o solo, pode prevenir acidentes provocados pela ruptura do maciço, gastos com posteriores reparos causados pela sua movimentação, como trincas, fissuras e recalques.

A fundação de uma edificação é um elemento estrutural que tem como função transmitir as cargas da estrutura para o maciço. Com isso, o solo, ao qual ela está inserida, deve apresentar resistência e rigidez capazes de suportar as tensões geradas pelos esforços da estrutura, sem que sofra rupturas e deformações. Para evitar tais problemas, investigações geológicas e geotécnicas no local são fundamentais.

Solos argilosos apresentam granulometria muito fina, baixa permeabilidade, drenagem lenta, alta resistência quando secos e consistência plástica e viscosa quando molhados, muitas dessas características, quando não trabalhadas adequadamente, podem trazer prejuízos significativos às obras.

Existem casos, em que solos argilosos não apresentam resistência o suficiente para serem utilizados sob obras de maior porte, como edificações e base e sub-base de rodovias, ou possuem uma característica de expansão maior que o aceitável. Com isso, deve-se estudar estratégias para lidar com tais problemáticas, sendo que essas soluções técnicas de execução devem propor um bom custo benefício.

Há estratégias que buscam modificar o projeto da obra, respeitando as restrições impostas pelo terreno, total substituição do material é outra opção. Mas atualmente, uma solução que tem sido muito utilizada em pavimentação, por exemplo, é a estabilização de solos, onde o principal objetivo é aproveitar o solo existente. Evitando gastos com substituição, melhorando algumas características dele, a partir da adição de um agente químico ou mecânico.

A cal hidratada quando adicionada a solos argilosos, em condições satisfatórias de umidade e homogeneidade, provoca mudanças positivas em algumas propriedades dos solos, tais como: granulometria, plasticidade, acidez, expansão, resistência, entre outros. Enquanto que a compactação do solo, reduz o número de vazios com a aplicação de pressão, vibração ou impactos, tornando o maciço mais homogêneo e resistente. Com isso, percebe-se que a cal hidratada faria o papel de material químico estabilizante e a compactação seria responsável pela estabilização mecânica do solo.

O solo em questão, apresenta características peculiares e complicadas de se trabalhar. Esse estudo ainda não havia sido desenvolvido para a perspectiva da construção civil, então, pode-se contribuir com esse setor. Além da caracterização do solo, o trabalho propôs uma solução para melhorar as características do solo.

2. Desenvolvimento

2.1. Localização da área de estudo

O município de Sousa está localizado no nordeste brasileiro, no sertão paraibano. Segundo dados fornecidos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a cidade apresenta uma área de unidade territorial de 738,547 km², e no último levantamento (2010), apurou-se uma população de 65.803 habitantes, assim como densidade demográfica de 89,10 hab/km². A cidade está situada a 220 m de altitude e possui as seguintes coordenadas geográficas: latitude: 6° 46' 4" Sul e longitude: 38° 12' 36" Oeste.

2.2. Classificação do solo

O estudo e classificação dos solos é indispensável para todas as atividades humanas, pois permite estimar o comportamento do solo, a partir da identificação de dados físicos, químicos, mineralógicos e morfológicos. Com posse desses dados, observar os pontos positivos e negativos e com isso, pode-se determinar a melhor forma a se trabalhar, podendo melhorar suas características e limitações, a partir do emprego de outros materiais.

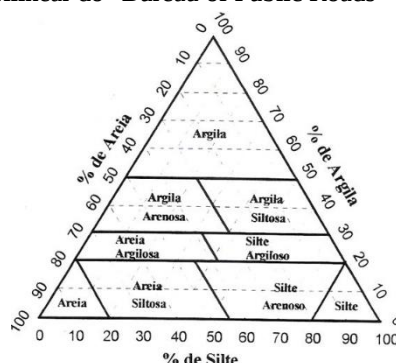
A classificação de um solo é obtida a partir da avaliação dos dados morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do perfil que o representam. Aspectos ambientais do local do perfil, tais como clima, vegetação, relevo, material originário, condições hídricas, características externas ao solo e relações solo-paisagem, são também utilizadas (EMBRAPA,

Os principais sistemas de classificação utilizados neste trabalho se baseiam nas características dos grãos que constituem os solos. Os parâmetros que essas classificações utilizam são geralmente os Índices de Atterberg e a Composição Granulométrica do solo. Pode-se observar abaixo os três sistemas de classificação de solos mais utilizados:

I. Classificação Trilinear dos Solos

“A textura do solo é influenciada pelo tamanho das partículas individuais presentes nele. [...] Na maioria dos casos, os solos naturais são misturas de partículas de grupos de diversos tamanhos” (Das, 2014). Esta classificação é feita baseando-se na granulometria dos constituintes do solo (argila, silte e areia), onde cada um dos eixos representa uma dessas frações granulométricas (Figura 1).

Figura 1 – Gráfico trilinear do "Bureau of Public Roads"



Fonte: Caputo (2016)

II. AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)

Esse sistema, se limita a classificar solos a serem utilizados em sub-bases de estradas e aterros. Na Figura 2, pode-se observar que a classificação é feita a partir de três variáveis, a granulometria do solo, limites de Atterberg e o Índice de grupo.

Fonte: Senço (2007)

III. SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos):

O sistema de classificação dos solos da SUCS (Sistema unificado de Classificação dos

Figura 2 – Quadro de classificação de solos adotada pela ASSHTO

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 / A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Grupo											
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Grupo	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Frac a pobre			

Solos) foi desenvolvido por Arthur Casagrande.

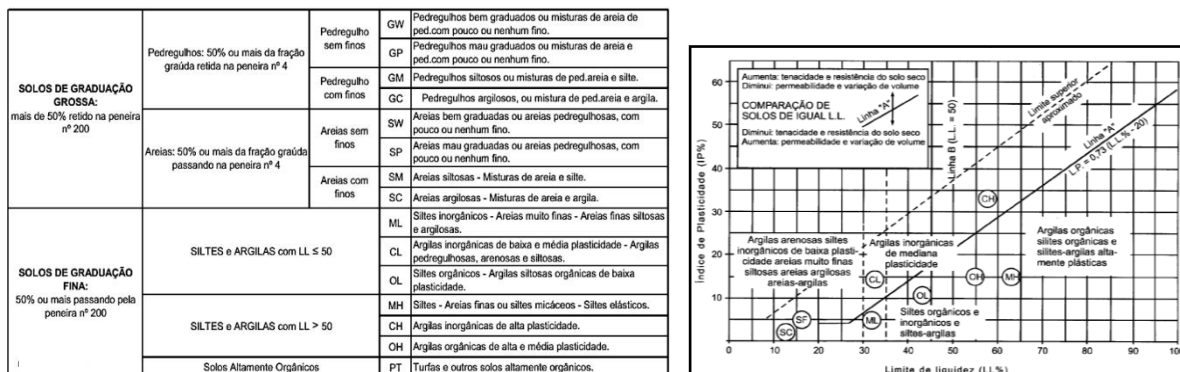
De acordo com o DNIT (2006):

O Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS) resultante de um trabalho conjunto do Bureau of Reclamation e do Corps of Engineers, assistido pelo professor Arthur Casagrande, da Universidade de Harvard, foi publicado, em 1953, pelo Waterways Experiment Station como aperfeiçoamento e ampliação do sistema elaborado por Casagrande para aeroportos em 1943.

Vale ressaltar que, após constantes atualizações, atualmente, este método é utilizado tanto em aeroportos, quanto em aterros e fundações.

A classificação se dá inicialmente pela porcentagem que passa na peneira de nº 200.

Figura 3 e 4 – Quadro de classificação de solos e gráfico de Casagrande, respectivamente



De posse dessa informação e do valor do Limite de liquidez, determina-se qual tipo predominante de partículas de solo (Figura 3). Por último, classifica-se o solo segundo sua plasticidade, esta etapa é feita a partir do uso do gráfico de plasticidade de Casagrande (Figura 4).

Fonte: DNIT (2006) e Caputo (2016)

2.4. A cal como material estabilizante

Guimarães (2002) explica que a escolha entre os materiais varia de acordo com alguns fatores, como: econômicos, finalidade da obra, características do material e as propriedades do solo.

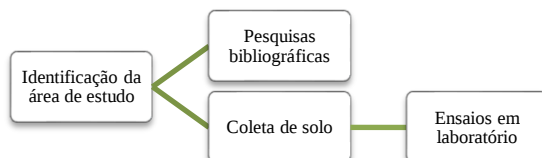
É comum encontrar na literatura, a incorporação da cal ao solo, com o objetivo de corrigir características como a plasticidade, expansão e baixa capacidade de suporte de solos. Sendo esse, um dos materiais mais empregados na construção civil e com ampla utilização, desde processos mais simples, como em argamassa de assentamento, até uso mais complexos, como na estabilização de solos.

Araújo (2009) afirma que a mistura de solo natural e cal resultará em um material mais resistente mecanicamente, apresenta também redução de plasticidade e expansão, além de uma redução da susceptibilidade à água.

3. Materiais e Métodos

A metodologia deste trabalho foi dividida em quatro etapas, a primeira, se resume a identificação e estudo da área escolhida, a segunda foram realizadas pesquisas bibliográficas com o intuito de coletar dados que acrescentassem a pesquisa. Na terceira etapa, foi feita a coleta de solo e por fim, a última etapa, foram realizados os ensaios de laboratório para a caracterização química e física do solo, além dos ensaios de expansão e resistência. No Fluxograma 1 está ilustrada a sequência das atividades executadas durante este estudo.

Fluxograma 1 – Sequência de atividades realizadas durante o estudo

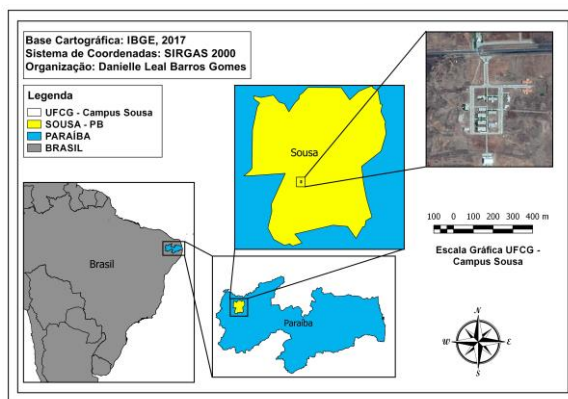


Fonte: O autor (2019)

3.1 Local da coleta do solo

O solo foi coletado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em Sousa - *Campus II*. Este local foi escolhido devido à aparição de patologias, como trincas em alguns edifícios da universidade. Devido principalmente ao pouco tempo de sua instalação (inauguração em dezembro de 2012), essas patologias tem causado algumas discussões. Esse campus da UFCG, fica às margens da Rodovia Transamazônica (BR-230), no município de Sousa, no estado da Paraíba, a aproximadamente 440 km de distância da capital, João Pessoa (Figura 5).

Figura 5 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: O autor (2019)

3.2 Classificação do solo de Sousa-PB

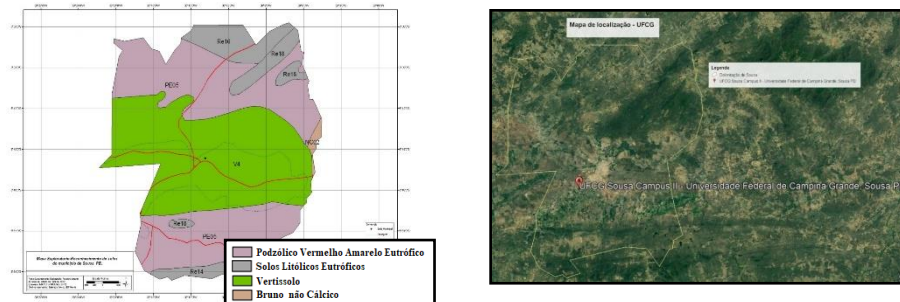
No município de Sousa, foco do presente trabalho, foi coletado um solo tido como problemático, devido suas características serem tão distintas, quando se comparam o período de estiagem e de chuva. As fendas de retração que aparecem no período seco, são profundas e largas e o solo apresenta alta resistência, em contrapartida, em períodos de chuva, a plasticidade deste solo aumenta consideravelmente.

Na Figura 2, apresenta-se o mapa dos solos presentes no município de Sousa, fornecido pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA), e a Figura 3 uma imagem de satélite da cidade.

Fonte: Adaptado de EMBRAPA Solos (2006) e Google Earth (2019)

Comparando-se a Figura 3 com a Figura 2, pode-se afirmar que a região em que o

Figura 3 e 3 – Mapa dos solos e mapa do município de Sousa-PB, respectivamente



material foi coletado, apresenta um solo do tipo Vertissolo.

De acordo com a EMBRAPA (2006):

Os vertissolos são solos constituídos por material mineral apresentando horizonte vértico e pequena variação textural ao longo do perfil, nunca suficiente para caracterizar um horizonte B textural. Apresentam pronunciadas mudanças de volume com o aumento do teor de água no solo, fendas profundas na época seca, e evidências de movimentação da massa do solo, sob a forma de superfícies de fricção

(slickensides). [...] São de consistência muito plástica e muito pegajosa, devido à presença comum de argilas expansíveis ou mistura destas com outros argilominerais.

3.3 Ensaios em laboratório

Foram feitos ensaios de análise granulométrica (NBR-7181/1984 como referência), Limite de plasticidade (NBR-7180/1984) e Limite de liquidez (NBR-6459), ambas da ABNT.

Também foi feito o ensaio de compactação (NBR-7182/2016). Foram feitas compactações para os dois tipos de energia (Proctor Normal e Intermediário). E por último o ensaio de compressão simples, como não existe nenhuma norma brasileira que regularize a determinação da resistência à compressão simples com uso de cal hidratada, foi utilizada como base, a norma que mais se assemelha na utilização da mistura solo-cal, que é a DNER-ME 180/1994.

3.4 Corpos de prova utilizados

Para a moldagem dos corpos de prova foram estabelecidos os teores de cal de 2,0, 4,0, 6,0, 8,0, 10,0% em relação a massa de solo calculada, para as duas energias escolhidas, a Energia do Proctor Normal e Intermediário, utilizando os parâmetros de umidade ótima, massa específica aparente seca e umidade higroscópica. Além disso, foram estabelecidos dois tempos de cura para a mistura, para sete e quatorze dias.

Com isso, para cada teor de cal, foram moldados doze corpos de prova, resultando num total de sessenta e quatro corpos de prova, trinta e dois para cada energia de compactação, sendo quatro desses corpos de prova sem acréscimo de cal.

4. Resultados e Discussões

4.1. Análise granulométrica

Obteve-se as seguintes frações de solo de acordo com a escala definida pela ABNT.

Fração	Tamanho dos Grãos	Composição do Solo
Matacão	$25\text{ cm} < \varnothing < 1\text{ m}$	0%
Pedra	$7,6\text{ cm} < \varnothing < 25\text{ cm}$	0%
Pedregulho	$4,8\text{ mm} < \varnothing < 7,6\text{ cm}$	0%
Areia Grossa	$2\text{ mm} < \varnothing < 4,8\text{ mm}$	0%
Areia Média	$0,42\text{ mm} < \varnothing < 2\text{ mm}$	7,70%
Areia Fina	$0,05\text{ mm} < \varnothing < 0,42\text{ mm}$	15,31%
Silte	$0,005\text{ mm} < \varnothing < 0,05\text{ mm}$	21,13%
Argila	$\varnothing < 0,005\text{ mm}$	55,86%

Segue a Tabela 1 com as frações do solo.

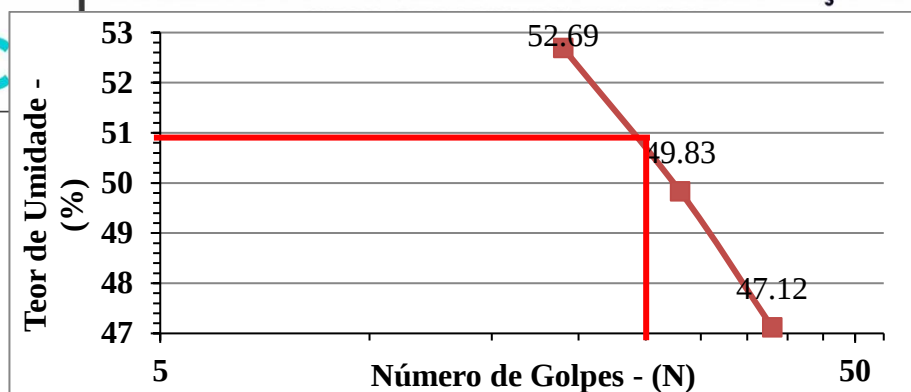
Tabela 1 – Composição granulométrica do solo, para o sistema da ABNT

Fonte: O autor (2019)

4.2. Análise dos ensaios de Limites de Atterberg

A partir dos resultados obtidos no ensaio de Limite de Liquidez (LL), pôde-se gerar um gráfico (Figura 4), para assim definir o valor do LL. Após os procedimentos de cálculo, obteve-se o LL = 50%.

Figura 4 – Gráfico de Limite de Liquidez



Fonte: O autor (2019)

Já para o limite de plasticidade (LL), obteve-se resultado final com a média de seis valores, onde esta média foi recalculada, excluindo os valores que diferissem em mais ou menos 5%. Desta forma, após a metodologia de cálculo, obteve-se o LP = 21%.

4.3. Análise e classificação do solo

I. Classificação Trilinear do Solo:

A partir da granulometria do solo e os valores adotados por Das (2015), encontrou-se 46,46% de argila, 30,51% de silte e 23,03% de areia.

II. AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials):

Em função da porcentagem que passa na peneira de nº 200, LL e IP, obteve-se um valor de Índice de Grupo (IG) = 17,60, sendo classificado como solo argiloso.

Com isso, para finalizar a classificação da AASHTO e os resultados obtidos em laboratório dos Limites de Atterberg e o Índice de grupo, o solo trabalhado é do tipo A-7-6, sendo que neste, o material predominante é a argila e seu comportamento geral para uso em subleito é de fraco a pobre.

III. SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos):

Com os valores de LL = 50% e IP = 29%, e com o auxílio do gráfico de plasticidade de Casagrande, o solo é classificado como argila inorgânica com mediana plasticidade e este, se enquadra no grupo de argila de baixa compressibilidade (CL), devido seu $LL \leq 50\%$.

4.4. Análise do ensaio de compactação

A Tabela 2 apresenta o resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios de compactação na energia normal e intermediária para o solo em seu estado natural.

Tabela 2 – Parâmetros obtidos no ensaio de compactação

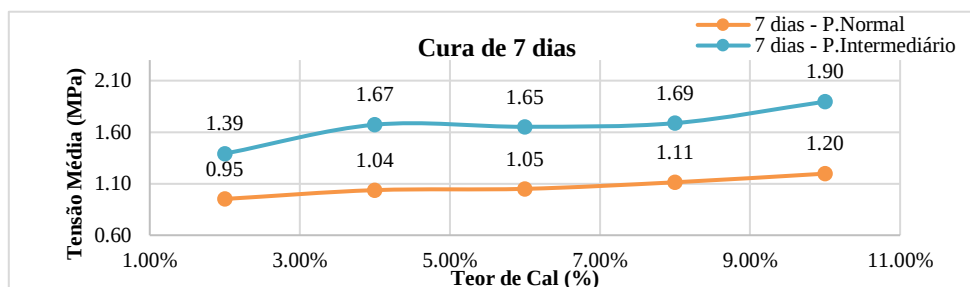
Parâmetros	Energias de Compactação	
	Normal	Intermediária
Energia de Compactação aplicada (kg.cm/cm³)	5,80	13,63
Umidade Ótima (%)	22	18,6
Massa Específica Seca Máxima (g/cm³)	1,57	1,73

Fonte: O autor (2019)

4.5. Análise do ensaio de compressão simples

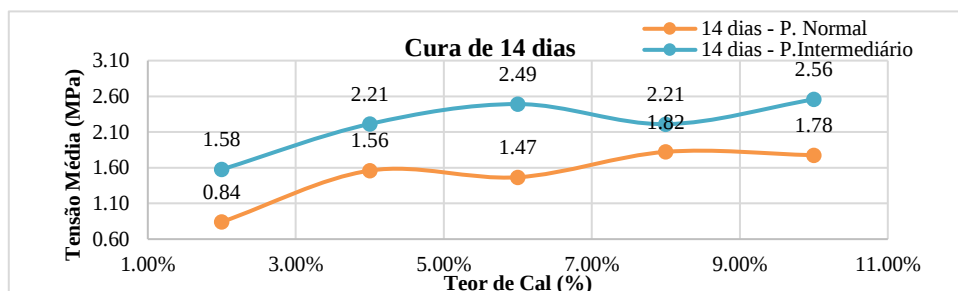
Para todos os 64 corpos de prova, notou-se uma pequena diminuição no peso, após o período de cura na câmara úmida, provocada pela redução do teor de umidade. Este fato, pode ser explicado devido a cal reagir e consumir parte da água disponível no corpo de prova. A

Figura 5 – Gráfico de tensão média em função do teor de cal, para cura de 7 dias



partir da análise de dados do ensaio de compressão simples, foram gerados dois gráficos comparativos, um para cura de 7 dias e outro para cura de 14 dias, ambos com as duas

Figura 6 – Gráfico de tensão média em função do teor de cal, para cura de 14 dias



energias de compactação indicadas anteriormente.

Fonte: O autor (2019)

Fonte: O autor (2019)

5. Considerações Finais

Neste trabalho, foi possível determinar parâmetros como a plasticidade, granulometria e resistência do solo. Além do mais, observou-se que o solo tem como fração predominante argila de baixa compressibilidade. Esse solo é uma argila siltosa que pertence ao grupo A-7-6 e do tipo CL (*clay low*), segundo a classificação adota pela AASHTO e a SUCS, respectivamente.

Observou-se que o solo estudado, em estado natural, não apresenta características satisfatórias para ser utilizado como base e sub-base de rodovias, no entanto, após o incremento da cal e sua compactação, constatou-se que esta técnica atingiu valores mínimos necessários para sua utilização nos trabalhos da engenharia rodoviária. Por fim, a cal se mostrou um bom produto a ser utilizado na estabilização de solos finos.

6. Referências

ARAÚJO, A. F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará.** 207f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia do Transportes, Universidade Federal do Ceará, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7180: Determinação do Limite de Plasticidade.** Rio de Janeiro. 1984.

- _____. **NBR-6459: Determinação do Limite de Liquidez.** Rio de Janeiro. 1984.
- _____. **NBR-7181: Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro. 1984.
- _____. **NBR- 7182: Solo: Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro. 1986.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 8. Ed. São Paulo: Cengage Learning.
- _____. **ME-180/94: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples.** Rio de Janeiro. 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentação.** 3 ed. IPR. Rio de Janeiro, 2006.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Embrapa Solos: Solos do Nordeste.** Disponível em: <www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index>. Acesso em 18 de dezembro de 2018.
- GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: Fundamentos e aplicações na engenharia civil.** 2.ed. São Paulo: Pini, 2002.