



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR - CCTA**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIA TECNOLOGIA AMBIENTAL - UACTA**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO  
ARGILOSO ARTIFICIALMENTE CIMENTADO**

**TÚLIO HENRIQUE GOMES**

Pombal – Paraíba  
2019

TÚLIO HENRIQUE GOMES

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO  
ARGILOSO ARTIFICIALMENTE CIMENTADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande/PB, como parte para obtenção dos requisitos necessários para o título de bacharel em Engenharia Civil.

ORIENTADOR: Pós-D. Sc. Saul Barbosa Guedes.

Pombal – Paraíba

2019

G633a Gomes, Túlio Henrique.

Análise da resistência a compressão simples de um solo argiloso artificialmente cimentado / Túlio Henrique Gomes. – Pombal, 2019.  
51 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)  
– Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e  
Tecnologia Agroalimentar, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Saul Barbosa Guedes".

Referências.

1. Caracterização do solo. 2. Cimento Portland. 3. Estabilização do solo. I. Guedes, Saul Barbosa. II. Título.


CDU 631.44(043)

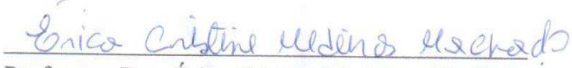
2019  
TÚLIO HENRIQUE GOMES

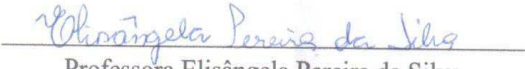
**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO  
ARGILOSO ARTIFICIALMENTE COM CIMENTO**

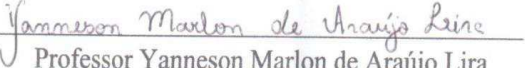
Aprovado em 27/11/2019

BANCA EXAMINADORA

  
Professor Pós D.S. Saul Barbosa Guedes  
Orientador

  
Professora Dra. Érica Cristine Medeiros Machado  
Coordenadora da Disciplina

  
Professora Elisângela Pereira da Silva  
Examinadora Interna

  
Professor Yanneson Marlon de Araújo Lira  
Examinador Externo

## AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus e a nossa senhora Sant'Ana, a meus pais pelo incentivo dado nesses últimos cinco anos de curso e ao meu orientador Saul B. Guedes pela ajuda e paciência que teve nesse semestre para que a pesquisa fosse realizada.

A minha namorada, Clara Beatriz, pelo apoio dado em momentos críticos da pesquisa para que eu não desanimasse. Aos meus amigos e colegas de apartamento Jesus, Yago e Yanneson, por toda ajuda e aprendizado que tive com eles. A todos meus amigos de Caicó/RN e não poderia esquecer os meus grandes amigos de Pombal que me ajudaram na vida acadêmica, Joao Paulo, Manoel, Brenno, Matheus, Arlei, Pedro Lucas, Lucas, Anderson e Arthur, todos estes foram de grande importância no decorrer de todo o curso de Engenharia Civil.

No local onde foi realizada a pesquisa, queria agradecer pela companhia dos meus colegas de laboratório, Danielle, Maria Rayanne, Thiago, Felipe, Marcos e o técnico Emanuel que ajudaram a fazer com que o tempo no laboratório e as atividades fossem feitas de um jeito mais descontraído.

Aos professores e técnicos que fiz amizade no decorrer do curso, por todos os ensinamentos dados por eles, Érica, Elisângela, Fernanda, Eudes, Emanuel, Hellykan.

E agradecer a todos que me ajudaram direto e indiretamente nesse período.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: efeito da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cimento Portland e curados por sete dias. -----	17
Figura 2 : Classificação de solos pela AASHTO. -----	21
Figura 3: Localização da cidade de Sousa no mapa do estado da Paraíba. -----	24
Figura 4: Mapa de solo, município de Sousa/PB. -----	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 5: Procedimentos de destorroamento do solo -----	26
Figura 6: Provetas utilizadas no ensaio de granulometria do solo. -----	27
Figura 7: aparelho de Casagrande.-----	27
Figura 8: vidro esmerilhado utilizado como base para o ensaio de limite de plasticidade. ---	28
Figura 9: a) picnômetros vazios e limpos, b) picnômetro com amostra de solo e água destilada colocado em cima do agitador magnético. -----	29
Figura 10: medição da mistura, com o auxílio do pHmêtro.-----	29
Figura 11: Preparação da amostra de solo e água.-----	30
Figura 12: Processo de nivelamento do solo compactado.-----	31
Figura 13: Ensaio de CBR -----	32
Figura 14: materiais utilizados para moldar os corpos de prova. -----	33
Figura 15: mistura de solo e cimento homogeneizado. -----	35
Figura 16: a) corpo de prova compactado e desmoldado b) corpo de prova enrolado em filme de PVC e etiquetado, c)câmara úmida para cura dos corpos de prova. -----	36
Figura 17: corpos de prova imersos em água por 24 horas.-----	37
Figura 18: Curva granulométrica com o solo utilizado. -----	39
Figura 19: Resultados do ensaio de compactação do solo.-----	43
Figura 20: gráfico das tensões para cada teor de cimento utilizado.-----	45
Figura 21: gráfico das tensões para cada teor de cimento, com tempo de cura de 14 dias. ---	45
Figura 22: gráfico comparativo das resistências da energia de proctor normal. -----	46
Figura 23: gráfico de resistência para tempo de cura de 7 dias, proctor intermediário. -----	47
Figura 24: gráfico da resistência para tempo de cura de 14 dias. -----	47
Figura 25: gráfico comparativo das resistências para energia de proctor intermediário. -----	48
Figura 26: gráfico comparativo das resistências encontradas para energia de proctor normal e intermediário, em seus tempos de cura de 7 e 14 dias. -----	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Indicativo da porcentagem de cimento em função do tipo de solo.-----	23
Tabela 2: Faixas de pH do solo e suas classificações. -----	30
Tabela 3: Composição Granulométrica a partir da ABNT . -----	40
Tabela 4: Resultados dos pH encontrados. -----	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AASHTO – *American Association of State Highway Transportation Officials*

CP V ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PCA – *Portland Cement Association*

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	14
2.1 – Objetivo geral .....	14
2.2 – Objetivos específicos .....	14
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
3.1 - Comportamento mecânico .....	15
3.1.1 - Resistência a compressão simples .....	15
3.2 – Técnicas solo-cimento .....	18
3.3 – Materiais utilizados no solo-cimento .....	19
3.3.1 – Solo .....	19
3.3.2 – Cimento .....	21
3.3.3 – Água .....	22
3.4 – Dosagem .....	22
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	24
4.1 – Primeira etapa: coleta de amostras .....	24
4.1.1 – Preparação das amostras .....	26
4.2 – Segunda Etapa: realização dos ensaios de caracterização .....	26
4.2.1 – Análise Granulométrica .....	26
4.2.2 – Limites de Atteberg .....	27
4.2.3 – Massa específica e densidade dos grãos .....	28
4.2.4 – Determinação do ph do solo .....	29
4.2.5 – Compactação do solo .....	30
4.2.6 – Ensaio de califonia bearing ratio (CBR) .....	31
4.2.7 – Preparação, moldagem e cura dos corpos de prova .....	33
4.2.8 - Ensaio de compressãp simples .....	38
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	39
5.1 – Análise do ensaio de granulometria do solo feita por peneiramento e sedimentação .	39
5.2 – Limites de atteberg .....	40
5.3 – Ensaio do potencial hidrogenionico (ph) .....	41
5.4 – Massa específica e densidade dos grãos .....	42
5.5 – Classificação do solo .....	42

5.6 – Ensaio de compactação do solo .....	42
5.7 – Ensaio de índice de suporte califórnia .....	43
5.8 – Ensaio de compressão simples.....	44
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>

## RESUMO

Com o aumento da construção civil e a dificuldade de se encontrar áreas que apresentem um solo considerado de boa resistência, é cada vez mais frequente buscar soluções que apresentem um custo benefício melhor para o tipo de obra a ser implantado. Situada na região do sertão paraibano, a cidade de Sousa/PB é um dos locais onde se apresenta dificuldades com o seu solo, com isso buscou-se fazer uma análise sobre o solo encontrado na região urbana do município. O solo coletado apresentava uma baixa resistência, fazendo com que fossem encontrados casos de fissuras em obras localizadas na região. O trabalho buscou caracterizar este solo e analisar se apresentaria uma maior resistência quando misturado com cimento. Os ensaios de caracterização utilizados foram os de granulometria, limites de atterberg, CBR, compressão simples, entre outros. A caracterização mostrou que o solo era do tipo argila-siltosa, este tipo de solo, em épocas de chuva apresenta uma baixa resistência e no período de estiagem uma alta rigidez. A partir disso, foi analisado, se a adição de cimento Portland, do tipo CP V ARI, nesse solo, causaria sua estabilização e aumento de sua resistência. Utilizou-se cinco diferentes teores de cimento (2, 4, 6, 8 e 10%) em relação ao peso seco do solo e foi feito testes para energia de compactação de proctor normal e intermediário. Foram feitos testes também para o tempo de cura de sete e de quatorze dias. A norma brasileira determina que a técnica solo-cimento, deve apresentar uma resistência mínima de 2,1 MPa, aos sete dias de cura, para que possa ser utilizado como camada de pavimento. A partir disso, pode-se considerar que os resultados encontrados no ensaio de compressão simples foram satisfatórios, pois três dos cinco teores de cimento utilizados conseguiram atingir a resistência mínima proposta pela norma brasileira.

Palavras-chave: Caracterização do solo, Cimento Portland, Estabilização do Solo.

## ABSTRACT

With the increase of civil construction and the difficulty of finding areas that present a soil considered to be of good resistance, it is increasingly frequent to look for solutions that present a better cost benefit for the type of work to be implemented. Located in the region of the Paraíba hinterland, the city of Sousa / PB is one of the places where it presents difficulties with its soil, so we sought to make an analysis of the soil of the municipality. The soil collected had a low resistance, causing cases of cracks to be found in works located in the region. The work sought to characterize this soil and analyze if it would present a higher resistance when mixed with cement. The characterization tests used were granulometry, atterberg limits, CBR, simple compression, among others. The characterization showed that the soil was clay-silt type, this type of soil, in times of rain presents a low resistance and in the dry season a high rigidity. From this, it was analyzed if the addition of Portland cement, type CP V ARI, in this soil, would cause its stabilization and increase of its resistance. Five different cement contents (2, 4, 6, 8 and 10%) in relation to the dry weight of the soil were used and tests were made for normal and intermediate proctor compaction energy. Tests were also made for the healing time of seven and fourteen days. The Brazilian standard determines that the soil-cement technique must have a minimum resistance of 2.1 MPa at seven days of cure, so that it can be used as a floor layer. From this, it can be considered that the results found in the simple compression test were satisfactory, since three of the five cement levels used achieved the minimum strength proposed by the Brazilian standard.

Keywords: Soil characterization, Portland cement.

## 1. INTRODUÇÃO

Solo é considerado para a engenharia como sendo o agregado não cimentado de grãos minerais e também de matéria orgânica decomposta, sendo que os espaços vazios entre as partículas sólidas são preenchidos com líquido e/ou ar, tendo-se também que o solo para a construção civil é usado como material de construção e suporte de fundações estruturais (DAS, 2010).

Com o crescimento populacional e o da construção civil nas últimas décadas, foi preciso à utilização de áreas que não apresentavam um solo tão favorável para construção. Com isso, o estudo e reconhecimento do solo são de grande importância para toda implantação de obra. Prevenindo acidentes que poderão ocorrer com o passar do tempo, como aparecimento de trincas e fissuras, o recalque da estrutura, entre outros. São reparações na obra que podem ser evitados com um bom estudo do solo.

O solo coletado na região urbana do município de Sousa/PB apresentou baixa resistência quando o mesmo entrava em contato com a água, é um solo de característica argilosa e conhecido popularmente na região como solo massapê. O clima do local é caracterizado como semiárido quente, com isso é bastante comum períodos de estiagem, no período seco o solo apresentava uma rigidez alta e pequenas fendas.

Com o passar dos anos, percebeu-se que a remoção de solos problemáticos não era tão viável economicamente e foram criadas técnicas de estabilização do solo, entre essas técnicas está a de solo-cimento, que consiste em adicionar cimento ao solo. Essa alternativa de estabilização fez com que o solo apresentasse uma maior resistência, melhor trabalhabilidade e o custo da obra fosse economicamente mais viável.

Várias pesquisas já foram feitas no Brasil e no mundo sobre a técnica de solo-cimento, porém poucas utilizam o solo argiloso para isso, os estudos estão mais concentrados em solos arenosos e siltosos. Apesar do grande número de pesquisas, ainda não se pode afirmar o teor de cimento Portland correto para se utilizar em determinado tipo de solo, pois todo solo apresenta uma característica diferente, fazendo com que os teores de cimento mudem de um solo para outro.

O melhoramento do solo pode ser utilizado para vários tipos de obra, entre eles está a estabilização de taludes, aterros, fundações e também pode servir como base e/ou sub-base de pavimentos.

Entre os objetivos da técnica de melhoramento de solo pode ser citado como sua principal característica, o aumento na sua resistência do solo, além disso, também apresentaram melhores desempenhos na permeabilidade, compressibilidade e estabilização do volume do solo.

## **2. – OBJETIVOS**

### **2.1 - OBJETIVO GERAL**

O objetivo do trabalho foi de desenvolver a caracterização geotécnica do solo coletado no município de Sousa/PB e de estudar a implementação de cimento Portland ao solo, analisando a mudança das suas características.

### **2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterização do solo, a fim de poder observar seu comportamento;
- Analisar o comportamento do solo, quando adicionado os teores de cimento e a alteração da resistência à compressão simples;
- Analisar dois tempos diferentes de cura utilizados na moldagem dos corpos de prova.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 - COMPORTAMENTO MECÂNICO**

A capacidade de um solo em suportar cargas e manter a estabilidade, irá depender de sua resistência; ocorrendo rompimento desse solo quando a sua resistência é ultrapassada (CAPUTO, 2008).

De acordo com GENS & NOVA (1993), do ponto de vista do comportamento mecânico, solos cimentados, rochas brandas e outros materiais similares, constituem uma classe de materiais situados em uma área intermediária entre a Mecânica dos Solos tradicional e a Mecânica das Rochas. Isto é visível quando se considera a relativa ausência de teorias e modelos matemáticos capazes de integrar o comportamento de todos estes materiais de uma maneira consistente e unificada.

Desse modo pode-se entender que cada solo apresentará um comportamento diferente quando misturado com o cimento, apresentando diferentes pontos de resistências mecânicas entre eles.

##### **3.1.1- RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES**

De acordo com CHANG & WOODS (1992) *apud* FOPPA (2005), a maioria dos trabalhos encontrados na literatura sobre solos cimentados artificialmente, o grau de cimentação é representado pela quantidade relativa de material cimentante, basicamente pela porcentagem de cimento em relação à massa de solo seco. Porém, o grau de cimentação não é a única função da quantidade de agente cimentado. Outros fatores também são comuns no processo, como a densidade, a forma e a natureza superficial das partículas desempenham um papel importante no processo. Por exemplo, a mesma quantidade de cimento Portland apresentará resistências diferentes ao ser adicionado em solos da mesma natureza, porém com densidades distintas. Isto ocorre porque, o solo mais denso, existe um maior número de pontos de contato entre as partículas e, com isso, a cimentação se desenvolve de maneira mais efetiva.

O aumento de teor de cimento nos solos tende a fazer com que sua resistência à compressão também aumente, porém, buscar altos teores de cimento para ser adicionado pode fazer com que o uso da técnica se torne menos eficiente economicamente.

De acordo com MACCARINI (1989) a transição da estrutura cimentada para uma desestruturada passa por estágios intermediários, entre os quais os dois mais importantes são, (1) o ponto de início de quebra das cimentações e (2) o segundo ponto de quebra, que ocorre quando a tensão aplicada as cimentações iguala-se a resistência das cimentações. Após, a resistência das cimentações diminui simultaneamente com as tensões aplicadas e as curvas de compressão das amostras cimentadas e desestruturadas tendem a convergir. MACCARINI (1989) demonstrou o caráter gradual do processo de quebra das cimentações através da análise da variação da perda de resistência à compressão diametral com a deformação volumétrica em ensaios de compressão isotrópica e anisotrópica.

De acordo com LEROUEIL & VAUGHAN (1990), o conceito de plastificação desenvolvido para descrever os efeitos da historia de tensões em argilas sedimentares é igualmente aplicável para solos estruturados. O ponto corresponde a uma descontinuidade no comportamento tensão-deformação sob variações monotônicas de tensão e a plastificação da estrutura é caracterizada por uma mudança irreversível na rigidez e resistência do material. É denominada superfície de plastificação o local geométrico, no espaço  $p':q$  por exemplo, dos pontos do material correspondente às possíveis combinações entre  $p'$  e  $q$ . Também destacou que após um trecho inicial rígido, o material atinge um ponto de plastificação, a partir do qual a curva do solo cimentado converge gradualmente para a linha de compressão do solo desestruturado.

Segundo AVERSA (1991) observa que se a tensão de plastificação relacionada com a porosidade é maior do que aquela relacionada com a cimentação, uma primeira quebra da estrutura pode ocorrer dentro da superfície limite do solo desestruturado, obscurecendo o efeito da cimentação.

Também observado por MACCARINI (1987), para um solo artificialmente cimentado com porosidades e graus de cimentação variáveis. Em particular, no caso de solo fracamente cimentados, um primeiro ponto de plastificação dentro do espaço “pré-adensado” foi observado.

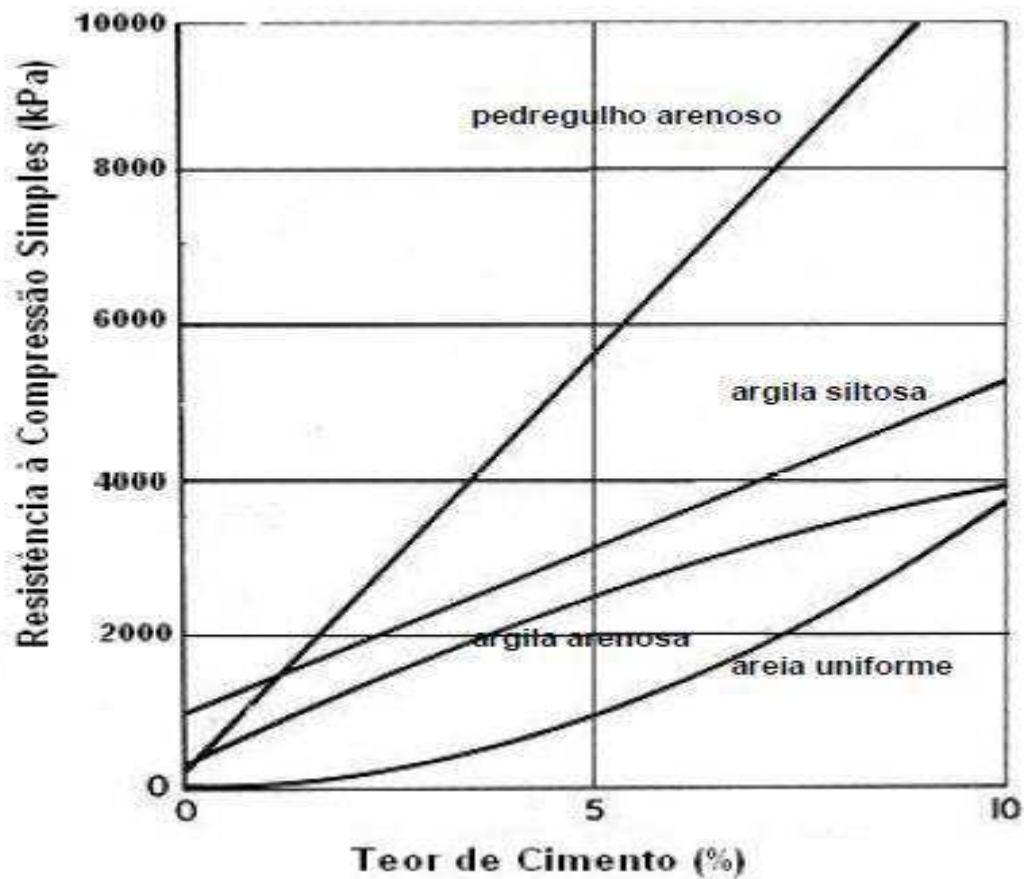
Os autores COOP & ATKINSON (1993) destacam também que o solo cimentado apresenta um ponto de plastificação mais acentuado em relação ao solo não cimentado, e que, aumenta com o aumento do teor cimentação utilizado.



De acordo com LADE & OVERTON (1989), o aumento da rigidez causado pela cimentação claramente afeta o comportamento volumétrico do solo. Para JURAN & RICCOBONNO (1991), o efeito da cimentação resulta em uma restrição da dilatância do solo no estágio pré-pico.

A Figura 1 demonstra as resistências à compressão simples que cada tipo de solo pode atingir. De forma que os solos que apresentam uma granulometria parecida tendem a ter uma menor resistência à compressão, em relação aos solos mais grossos e que contém uma maior diversidade no tamanho dos seus grãos.

Figura 1: efeito da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cimento Portland e curados por sete dias.



Fonte: INGLES & METCALF (1972).

### 3.2 – TÉCNICAS SOLO-CIMENTO

De acordo com a NBR 12253/92, Solo-cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento, a técnica de solo-cimento é definida como sendo o “produto endurecido resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através da dosagem, conforme este projeto, e executado conforme a NBR 12254/90”.

Para INGLES & METCALF (1972), a técnica de estabilização de solo adicionando cimento se baseia em distribuir o cimento por toda a superfície do solo, aplicar água ao solo e depois compactá-lo. Baixas quantidades de cimento, quando incorporada, já são capazes de modificar as características do solo, por exemplo, na utilização da porcentagem de 2,0%. O autor destacou que o cascalho limpo, quando adicionado de 5 a 10% de cimento, terá semelhanças com um concreto, podendo ser comparado ao concreto magro.

Duas fases descrevem as reações da mistura de solo com o cimento, são elas: primeira e segunda fase. Na primeira fase, ocorreram reações de hidratação do cimento Portland. Na segunda fase, existem as reações entre os argilo-minerais que estão situados no solo e o hidróxido de cálcio liberado para hidratação do cimento (ABIKO, 1987).

Segundo SENÇO (2001), o início da aplicação da técnica de solo-cimento no Brasil foi no estado de São Paulo, em meados dos anos 50, pelo motivo do grande no interior do estado e, com isso, a importância em ampliar a malha rodoviária. A primeira experiência de campo foi realizada para o acesso ao aeroporto de Bauru, num trecho com cerca de quinhentos metros. Posteriormente foi feita a pavimentação para o acesso ao aeroporto Prudente-Pirapozinho, com uma extensão de 14 km.

Utiliza-se o solo-cimento quando não se dispõe de um material ou combinação de materiais com características de resistência, deformabilidade, permeabilidade ou durabilidade adequada ao projeto. Dentre as diversas técnicas de estabilização, a técnica de estabilização com cimento é a mais utilizada. A estabilização com cimento é largamente empregado na construção de estradas, sendo geralmente utilizada como base ou sub-base do pavimento. (INGLES & METCALF, 1972).

Outra grande utilização da técnica de solo artificialmente cimentado é na proteção de taludes contra o fenômeno de erosão em obras hidráulicas como em barragens de terra. Embora a camada de fragmento rochoso tenha sido tradicionalmente utilizada para tal

finalidade, existem situações onde rochas adequadas não estão disponíveis ou também quando a distância de transporte é inviável para essa alternativa. Neste caso a técnica de solo-cimento pode ser mais econômica e apropriada solução (USACE, 2000).

De acordo com CONSOLI et al. (2011) *apud* CANEPPELE (2016), variáveis como o tipo de solo, a porcentagem de cimento na mistura, a umidade, o grau de compactação, controlam as propriedades e características de mistura de solo-cimento. A técnica de solo-cimento é utilizada com êxito em bases para pavimentos, revestimentos de canais, proteção de encostas para barragens de terra e como uma camada de base para fundações superficiais.

A adição de cimento ao solo provoca mudanças nas suas propriedades. Tanto o maior ou o menor grau, ou velocidade com que essas mudanças se processam, depende de características específicas do solo; teor adicionado de cimento, quantidade de água utilizada, tipo e grau de compactação, temperatura, etc (FEUERHARMEL, 2000).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) destaca a técnica de solo-cimento como sendo:

“Material proveniente de mistura de solo, cimento e água em proporções previamente determinadas por processo próprio de dosagem em laboratório, de forma a apresentar determinadas características de resistência e durabilidade”.

### **3.3 – MATERIAIS UTILIZADOS NO SOLO-CIMENTO**

#### **3.3.1 – SOLO**

Segundo FELT (1995) *apud* FOPPA (2005), as propriedades finais do solo-cimento são dependentes, em sua maioria, do tipo de solo envolvido. Certas diferenças nas propriedades e nas reações do cimento são devidas a variações na composição química do solo.

De acordo com CROFT (1967) *apud* CANEPPELE (2016), a composição química e mineralógica do solo determina o sucesso da estabilização com adição de cimento. Destaca também que a presença de grandes teores de argila, faz com que o endurecimento e a hidratação adequada para o solo seja retardada.

Segundo NOBLE & PLASTER (1970) *apud* FOPPA (2005), verificaram em um estudo com três solos argilosos, que a fração de argila sofre ataque e deterioração quando em contato com o cimento Portland. Foi observado que o tipo argilo-mineral mais suscetível é a montmorilonita, seguida da illita. Porém, conforme os ensaios de compressão simples foram indicados que o percentual de argila presente no solo é mais importante, em relação ao aumento da resistência em pequeno prazo do solo-cimento, do que o tipo do argilo-mineral.

Mostrando com isso uma das condições para o solo argiloso não ser muito utilizados para a técnica de solo-cimento, pois com a deterioração de seus grãos, o solo tende a ficar com uma resistência menor.

Segundo a EMBRAPA (2006), vertissolos são solos constituídos por material mineral apresentando pequena variação textural ao longo do perfil, este não é considerado suficiente para caracterizar o solo em um horizonte B. Apresentam mudanças de volume com o aumento do teor de água no solo, fendas profundas na época seca e evidências de movimentação da massa de solo, sob a forma de superfície de fricção. Podem apresentar micro relevo e estruturas do tipo cuneiforme, inclinadas e formando ângulo com a superfície horizontal. Estas características resultam da grande movimentação de massa do solo que se contrai e fendilha quando seca e expande quando úmida.

Este solo apresentou característica muito dura, quando estava seco, quando úmido se tornaram firmes e quando encharcados, apresentou uma consistência mais plástica e pegajosa.

A NBR 12253/92, Solo-cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento exige a utilização de solo que estejam limitados às classes A1, A2, A3 ou A4, de acordo com a classificação da AASHTO, esses solos devem ter 100% do seu material passante na peneira de abertura de 76 mm e no máximo 45% do seu material retido na peneira de abertura 4,8mm. Essas classes apresentam, para camadas de pavimento, um comportamento excelente a bom.

Figura 2: Classificação de solos, Sugestão do Highway Research Board-HRB pela AASHTO.

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-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
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	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							Fraco a pobre			

**Processo de classificação:** Com os dados de laboratório, iniciar a classificação da esquerda para a direita, por eliminação.

O primeiro grupo da esquerda que satisfizer os dados será o grupo procurado.

**SOLOS A-7:** Se  $IP \leq LL - 30$ , será A-7-5; Se  $IP > LL - 30$ , será A-7-6.

**Índice de Grupo (IG):**  $IG = 0,2 \cdot a + 0,005 \cdot a \cdot c + 0,01 \cdot b \cdot d$

Onde:

p: teor de silte + argila do solo, ou seja, a porcentagem que passa na peneira nº 200.

$a = p - 35$  (se  $p > 75\%$ , adota-se 75 e se  $p < 35\%$ , adota-se 35)  $a$  varia de 0 a 40 e 0,2 .  $a$  varia de 0 a 8.

$b = p - 15$  (se  $p > 55\%$ , adota-se 55 e se  $p < 15\%$ , adota-se 15)  $b$  varia de 0 a 40 e 0,01 .  $b \cdot d$  varia de 0 a 8.

$c = LL - 40$  (se  $LL > 60\%$ , adota-se 60 e se  $LL < 40\%$ , adota-se 40)  $c$  varia de 0 a 20 e 0,005 .  $a \cdot c$  varia de 0 a 4.

$d = IP - 10$  (se  $IP > 30$ , adota-se 30 e se  $IP < 10$ , adota-se 10)  $d$  varia de 0 a 20 e 0,01 .  $b \cdot d$  varia de 0 a 8.

$IG_{\min} = 0$   $IG_{\max} = 20$

IG - o resultado final obtido deve ser um nº inteiro - aproximação para o nº inteiro acima.

Fonte: Manual de Técnicas de Pavimentação.

Ainda assim, INGLÉS & METCALF (1972), observam que qualquer tipo de solo pode ser tratado com cimento, mas os solos arenosos apresentam uma maior eficiência por causa de suas maiores resistências e facilidade de mistura.

### 3.3.2 – CIMENTO

Segundo os estudos feitos em areias cimentadas por CONSOLI (2012), percebeu-se que o cimento que obteve maiores resistências foi o cimento Portland de alta resistência inicial CP-V ARI. Não ocorrendo restrição quanto a utilização de outros cimentos.

Um das principais características do cimento Portland CP-V ARI é sua alta resistência em poucos dias, isso se dá pela diferença na dosagem do calcário e da argila na produção do clínquer, bem como o tamanho dos seus grãos, que são menores que os de outros tipos de cimento Portland e quando reagem com a água adquirem uma resistência maior com mais velocidade. O cimento não para de ganhar resistência nos primeiros dias de cura, ele continua a aumentar até os 28 dias.

Segundo INGLES & METCALF (1972) o cimento é o material de custo mais elevado na técnica de solo-cimento, por isso é preciso ser realizado ensaios de laboratório para determinar o teor mínimo que será utilizado atendendo as especificações necessárias. Também podendo ser necessário encontrar o limite máximo de cimento para impedir efeitos como o trincamento.

### **3.3.3 – ÁGUA**

Segundo INGLES & METCALF (1972), a água potável pode ser considerada adequada para o uso na técnica do solo-cimento, devendo-se evitar o uso de água muito orgânica. A determinação de sua quantidade é feito pela umidade ótima que foi observada no ensaio de compactação do solo.

### **3.4 – DOSAGEM**

Na base em que foram sendo feitos os estudos sobre a técnica solo-cimento, a ASTM, no ano de 1944, começou a elaborar métodos sobre esse ensaio. No Brasil, iniciou-se com métodos análogos pela Associação Brasileira de Cimento Portland. Outros métodos foram criados a partir dos métodos iniciais, sendo eles baseados nos métodos da Portland Cement Association (PCA) aceito pela ASTM. (CERATTI & CASANOVA, 1988).

A NBR 12253/92 apresenta para a técnica de solo-cimento, um valor de resistência mínima de 2,1Mpa aos sete dias de idade. Descrevendo alguns passos para o procedimento de dosagem:

- São indicados porcentagens de cimento de 5 a 10% para solos que tiveram sua classificação granulométrica em A1, A2, A3 ou A4 da norma ASTM D 3282;
- Realizar o ensaio de compactação conforme a NBR 12023/92, utilizando os teores de cimento sugerido para se obter uma umidade ótima e uma massa específica aparente seca máxima;
- Utilizar um ou mais teores de cimento para moldar corpos de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento simples, a fim de obter a resistência mínima de 2,1Mpa. Para cada teor de cimento selecionado deve moldar e curar três corpos de prova;

- Passado o tempo de cura, deve ser executado o ensaio de resistência a compressão simples de acordo com a NBR 12025/90;
- Após romper os corpos de prova, calcular a média aritmética das resistências à compressão simples. Devem ser excluídos valores individuais que se afastem mais de 10% da média das resistências;
- Adotar o menor teor de cimento para o qual a resistência a compressão simples foi maior ou igual a 2,1 Mpa, aos sete dias de cura.
- Admite-se interpolação gráfica dos dados para a determinação do teor de cimento que corresponda ao valor mínimo da resistência a compressão media especificada;
- O teor mínimo de cimento recomendado pela NBR 12253/92 é de 5%. Porém podem-se utilizar teores de até 3,5%, em massa, desde que seja satisfeita a resistência mínima.

INGLES & METCALD (1972), apresentam uma tabela que indica a quantidade de cimento que deve ser utilizado para estabilização de cada tipo de solo, conforme a tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Indicativo da porcentagem de cimento em função do tipo de solo.

<b>TIPO DE SOLO</b>	<b>PORCENTAGEM DE CIMENTO</b>
Pedra finamente britada	0,5 a 2
Pedregulho areno-argiloso bem graduado	2 a 4
Areia bem graduada	2 a 4
Areia mal graduada	4 a 6
Argila-arenosa	4 a 6
Argila-siltosa	6 a 8
Argila	6 a 15

Fonte: INGLES & METCALF (1972).

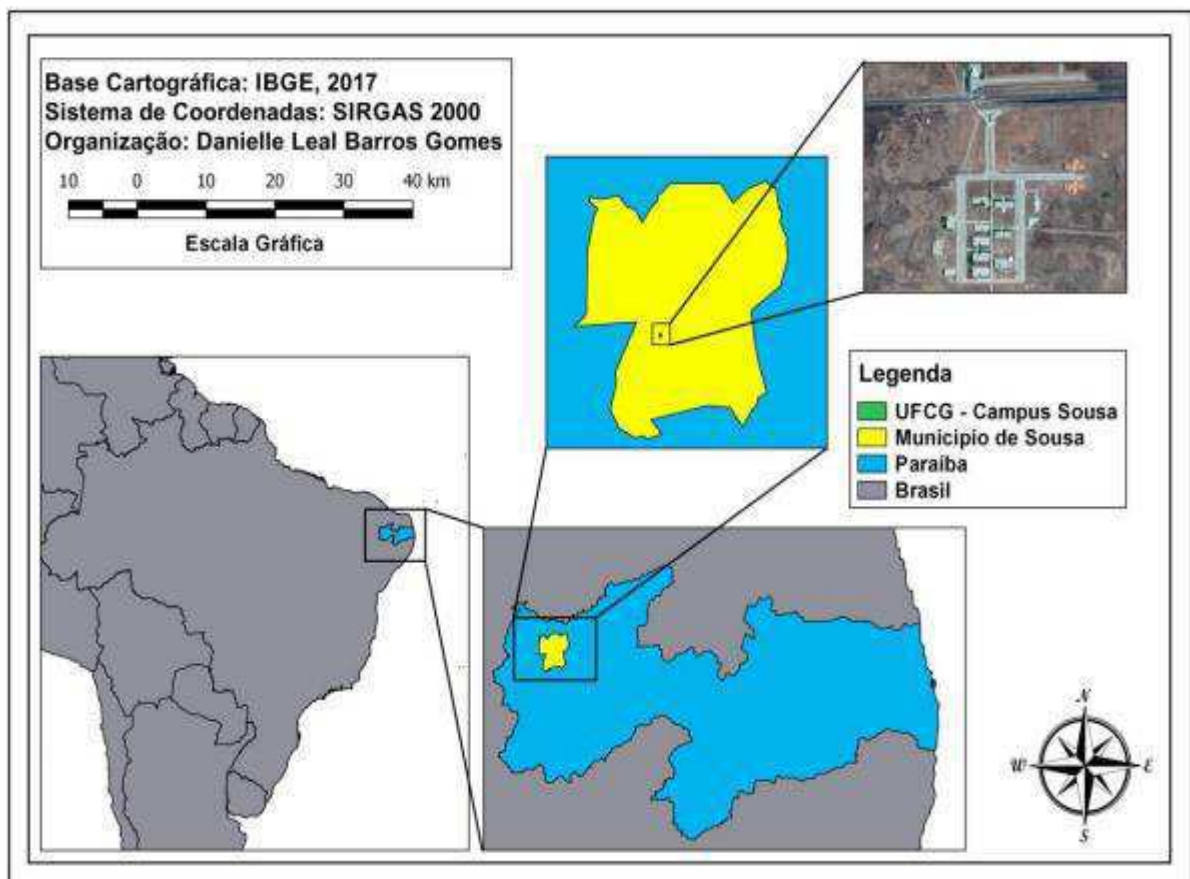
## 4. METODOLOGIA

### 4.1 – Primeira etapa: COLETA DE AMOSTRA

O local onde foi feita a coleta de amostra está situado dentro da Universidade Federal de Campina Grande, localizada na cidade de Sousa/PB. Localizada a 385 km de João Pessoa/PB. A amostra foi coletada no estado deformado e sua escavação foi feita por meio de ferramentas manuais, realizando uma coleta em quantidade suficiente para realizar todos os ensaios previstos no estudo.

Após coleta, a amostra foi colocada em sacos plásticos e vedada para ser evitada a contaminação da mesma. Depois foi levado para o Laboratório de Resíduos Sólidos da Universidade Federal de Campina Grande, campus Pombal/PB.

Figura 3: Localização da cidade de Sousa no mapa do estado da Paraíba.



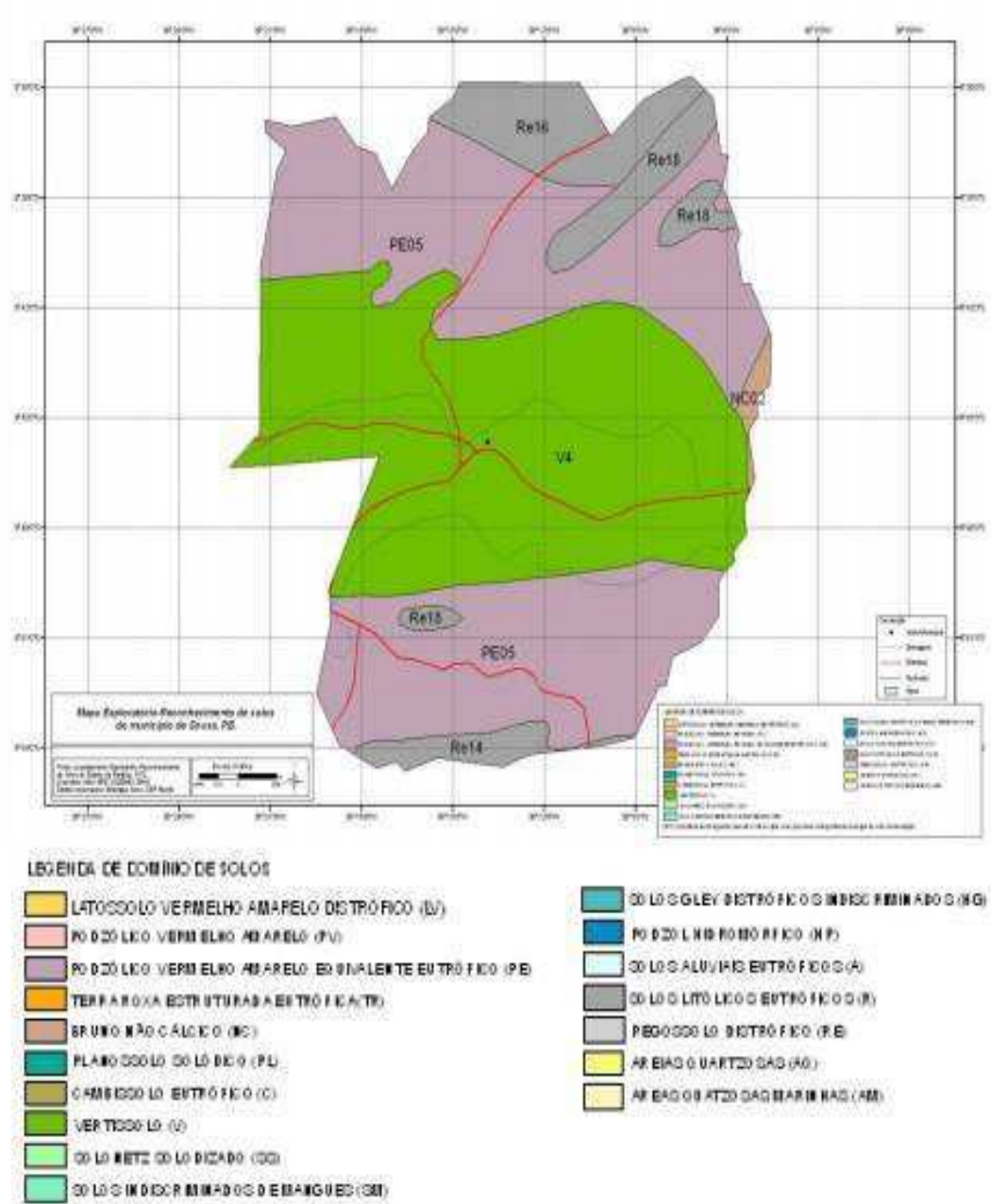
Fonte: próprio autor (2019).

A figura 4 mostra o ponto de coleta da amostra deformada, feita dentro da Universidade Federal de Campina Grande, campus Sousa/PB.



O mapa de solo da cidade de Sousa/PB apresentou um solo para sua região urbana do tipo Vertissolo. Esse solo é conhecido popularmente na região como solo “massapê” e uma das suas características é a baixa resistência quando em contato com a água e também a sua alta rigidez em períodos de seca.

Figura 4: Mapa de solo do município de Sousa/PB.



Fonte: EMBRAPA (2006).

#### 4.1.1 – PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A preparação das amostras se deu pela secagem do solo coletado ao ar-livre, destorroamento, peneiramento e obtenção da umidade higroscópica indicada pela NBR 6457/86.

A figura 5 demonstra o processo de destorroamento do solo, inicialmente foi realizado a diminuição dos torrões de solo para facilitar no processo de destorroamento.

Figura 2: Procedimentos de destorroamento do solo: a) diminuição dos torrões de solo com a ajuda do rolo de madeira e a esteira de borracha. b) fase final, destorroamento do solo com o auxílio da mão de gral.



a)

b)

Fonte: o próprio autor (2019).

#### 4.2 – Segunda Etapa: REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

##### 4.2.1 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A fim de verificar as dimensões dos grãos de solo e das proporções relativas em que elas se encontram, foi realizada a análise granulométrica, representando com isso as porcentagens de solo que ficou retido em cada peneira. O ensaio utilizou a combinação da sedimentação e o peneiramento do solo.

Para determinação da granulometria, foram seguidos os procedimentos contidos na NBR 7181/94 – Análise granulométrica – Solo, da ABNT.

Figura 3: Provetas utilizadas no ensaio de granulometria do solo.



Fonte: o próprio autor (2019).

#### **4.2.2 – LIMITES DE ATTEBERG**

Limite de liquidez é utilizado para determinação da umidade na qual o solo passa do estado plástico para o líquido. O procedimento utilizado foi baseado na NBR 6459/84.

Figura 4: aparelho de Casagrande, contendo amostra, usado para realizar o ensaio de limite de liquidez.



Fonte: o próprio autor (2019).

Limite de plasticidade é utilizado para determinar o teor de umidade no qual o solo começa a sofrer fratura quando moldado até formar um cilindro de 3mm de diâmetro e 10cm de comprimento. Os procedimentos utilizados foram os contidos na NBR 7180/84.

Figura 5: vidro esmerilhado utilizado como base para o ensaio de limite de plasticidade.



Fonte: o próprio autor (2019).

#### **4.2.3 – MASSA ESPECÍFICA E DENSIDADE DOS GRÃOS**

A massa específica dos grãos de solo foi determinada pelos procedimentos descritos na NBR 6508/84 – Determinação da Massa Específica dos Grãos de Solo da ABNT.

Figura 6: a) picnômetros vazios e limpos, b) picnômetro com amostra de solo e água destilada colocado em cima do agitador magnético.



a)

b)

Fonte: o próprio autor (2019).

#### 4.2.4 – DETERMINAÇÃO DO pH DO SOLO

Para medir a quantidade de íons  $H_3O^+$  livres em um determinado volume de solo, foi realizado o ensaio de determinação de pH. Para isso, utilizou-se  $10\text{cm}^3$  de solo, passado na peneira de abertura de 2mm e em seguida foi adicionado 25ml de água destilada ao solo. Após isso, agitou por um minuto a mistura de solo e água. Depois de agitado, deixou a mistura em repouso por uma hora. Após esse período, utilizou-se o pHmêtro para aferir o valor encontrado para o solo.

Figura 7: medição da mistura, com o auxílio do pHmêtro.



Fonte: o próprio autor (2019).

Quanto a seu pH, o solo pode ser classificado como ácido, neutro ou alcalino. Representados pelo intervalo abaixo:

Tabela 2: Faixas de pH do solo e suas classificações.

<b>PH</b>	<b>Classificação</b>
0 a 6,9	Ácido
7	Neutro
7,1 a 14	Alcalino

#### **4.2.5 – COMPACTAÇÃO DO SOLO**

Para a compactação do solo, foram realizados ensaios com base nos procedimentos existentes na NBR 7182/2016 da ABNT. O ensaio é utilizado para determinar os teores ótimos de umidade e a massa específica aparente seca máxima.

Nesse estudo, foram feitos dois tipos de energia de compactação, sendo eles a energia de Proctor Normal e a energia de Proctor Intermediário.

Figura 8: Preparação da amostra de solo e água.



Fonte: o próprio autor (2019).

Figura 9: Processo de nivelamento do solo compactado.



Fonte: o próprio autor (2019).

#### 4.2.6 – ENSAIO DE CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

Para realização do ensaio de CBR, foram utilizadas a NBR 9895/87 – Índice de Suporte Califórnia – da ABNT e a norma 172/2016 – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – do DNIT. O ensaio tem como característica obter a expansão do solo e sua resistência à penetração após 96 horas, depois de retirado da água.

Figura 10: Ensaio de CBR - a) adição de água a amostra de solo, b) homogeneização do solo com a água, c) compactação da amostra, d) imersão do corpo-de-prova.



a)



b)



c)



d)

Fonte: o próprio autor (2019).



#### 4.2.7 – PREPARAÇÃO, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

1- Para a realização desta etapa, foi inicialmente feita a preparação da amostra de solo. Com o solo coletado (amostra deformada) e colocado ao ar livre para que fosse feita a secagem do mesmo. Após o solo seco, foi feito o destorroamento e passado na peneira de N° 4, não ficando nenhum material retido, pois o solo é muito fino. Depois de peneirado, foi separado 1,5kg de solo para determinar a umidade higroscópica. Os corpos de prova foram moldados em um cilindro de 10,0 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro. Produzindo três corpos de prova para cada teor de cimento utilizado.

Para o preparo do cimento, foi feito o peneiramento na peneira de N° 200. A fim de eliminar grandes aglomerados de partículas de cimento que pudesse dificultar na homogeneização com o solo. O cimento após ser peneirado, era armazenado em potes de vidro, para evitar que reagisse com a umidade do local.

2- Para esta etapa foi feita a separação dos materiais que seriam necessários utilizar na moldagem dos corpos de prova. Para início do trabalho, foi separado solo para moldagem de dois corpos de prova, com isso foi feito um treinamento para melhorar a forma de moldagem e ver qual meio era melhor para fazer a extração dos corpos de prova do molde cilíndrico, diminuindo o gasto de tempo.

Figura 11: materiais utilizados para moldar os corpos de prova.



Fonte: o próprio autor (2019).

3- A terceira etapa é definida pela moldagem dos corpos de prova com os teores de cimento estabelecidos, foram esses: 2,0; 4,0; 6,0; 8,0 e 10,0 % em relação à massa de solo seco. Compactados pelas duas energias de compactação (Proctor Normal e Intermediário).

Os teores de cimento foram estabelecidos por meio da pesquisa realizada por INGLES & METCALF (1972), que estabeleciam o uso da técnica de solo-cimento para solo do tipo argiloso, de 6 a 15% de cimento.

A literatura citada estabelece um valor de porcentagem de cimento maior do que os dois valores iniciais escolhidos para a pesquisa (2,0 e 4,0%). Estes valores foram deixados para que se pudesse observar o ganho de resistência do solo para baixas porcentagens de cimento.

A utilização de teores com porcentagens acima de 10,0% não foi utilizado pois poderia fazer com que a utilização da técnica de solo-cimento para essas porcentagens elevadas tornassem economicamente inviável sua implantação.

No estudo, foram moldados corpos de prova para dois tempos de cura (sete e quatorze dias), somando doze corpos de prova para cada teor de cimento utilizado. Gerando um total de sessenta corpos de prova moldado utilizando o cimento e quatro moldados sem nenhum teor incorporado.

A partir dos cálculos feitos para determinar a massa de solo, massa de cimento e quantidade de água. Foi dado o início ao processo de moldagem dos corpos de prova, começando com 2,0 % de cimento, para um período de cura de 14 dias e Energia de Proctor Normal.

- De início, pesou-se 1,200 kg de solo e separou em uma bandeja de plástico. Em seguida pesou a massa de cimento correspondente a 2,0% da massa total de solo. Dividiu a massa de solo e a de cimento em três recipientes, cada um com 400 g de solo. Após isso, foi feita a mistura da massa de solo com a de cimento até que ficassem homogêneas.

Figura 12: mistura de solo e cimento homogeneizado.



Fonte: o próprio autor (2019).

- Depois de homogeneizadas, foi adicionada na mistura a água, que correspondeu ao teor de umidade ótima encontrada de acordo com a energia aplicada.
- Com a amostra misturada, separou-se a mesma em mais três recipientes, cada um desse com a quantidade de solo que seria utilizado para cada camada a ser compactado.
- Antes de adicionar a mistura para sua compactação, as paredes e a base internas do cilindro foram lubrificadas com uma pequena quantidade de óleo lubrificante, isso foi feito para ajudar na desmoldagem do corpo de prova, evitando a aderência da mistura com o cilindro.
- Todos os corpos de prova foram moldados de maneira estática em três camadas. Para melhor distribuição do seu volume e melhorando a compactação. Após compactar cada camada, o solo era escarificado, para aumentar a aderência com a camada superior. O procedimento de escarificação não era realizado na terceira camada do corpo de prova. A massa de solo que sobrava era separadas em cápsulas, pesadas e colocadas na estufa para determinar o teor de umidade.
- Após terminar o procedimento de compactação, o corpo de prova era desmoldado, pesado e enrolado em papel filme de PVC, para evitar a perda de umidade. Em seguida era etiquetado, indicando a data, a hora, o teor de cimento utilizado, o número do corpo de prova e os dias de cura. Em seguidas foram armazenados em uma câmara úmida.

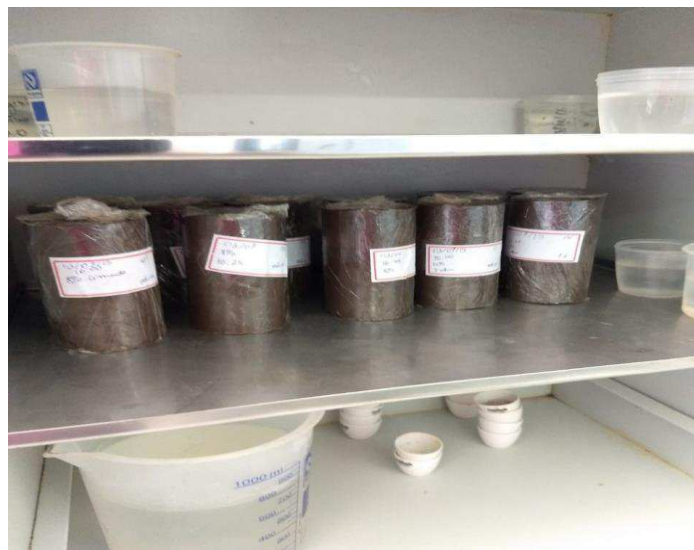
Figura 13: a) corpo de prova compactado e desmoldado, b) corpo de prova enrolado em filme de PVC e etiquetado para sua identificação, c) câmara úmida para cura dos corpos de prova.



a)



b)



c)

Fonte: o próprio autor (2019).

- A sexta etapa consistiu no processo de cura dos corpos de prova, utilizando dois tempos diferentes, 7 e 14 dias.

Os corpos de prova, depois de moldados, ficaram armazenados na câmara úmida por 6 e 13 dias. Tempo utilizado para que o cimento (ARI) adquirisse a hidratação necessária para desenvolver uma resistência mecânica considerável para o estudo. Após esse período de cura, foi retirado o filme de PVC e os corpos de prova foram levados para pesagem novamente para ser observado se existiu alguma variação de peso.

Em seguida foi feita a medição do corpo de prova (altura e diâmetro), pegando três pontos diferentes para o diâmetro e três pontos diferentes para a altura de cada corpo de prova. Esses dados foram utilizados para medir a massa específica aparente seca máxima.

- Na sétima etapa os corpos de prova foram imersos em água por um período de 24 horas, para maximizar o processo de saturação e diminuir o efeito da sucção na resistência do corpo de prova.

Figura 14: corpos de prova imersos em água por 24 horas



Fonte: o próprio autor (2019).

- A última etapa consistiu na retirada dos corpos de prova imersos em água, sua secagem, depois levados novamente para serem pesados e por ultimo foram colocados em uma prensa para que fosse feito o ensaio de compressão simples para medir a sua resistência.

#### **4.2.8 - ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES**

A maioria dos programas experimentais relatados na literatura mostram o ensaio de compressão simples como simples, de rápida execução e um meio confiável para verificar a resistência do método solo-cimento e a estabilização do cimento foi efetivada.

O ensaio de compressão simples foi realizado utilizando uma prensa manual com anel dinamométrico, com capacidade de 5000 kgf, aplicando a uma velocidade média de 1mm/min, conforme sugerido pela norma NBR 12025/1990.

Para auxiliar no ensaio, utilizaram-se dois extensômetro e um cronometro. A cada 15 segundos, o marcador do extensômetro deveria deslocar 0,25mm. A leitura principal era a da resistência máxima que o corpo de prova suportava, porém continuou-se fazendo a leitura até que a resistência de cada corpo de prova chegasse próxima à zero.

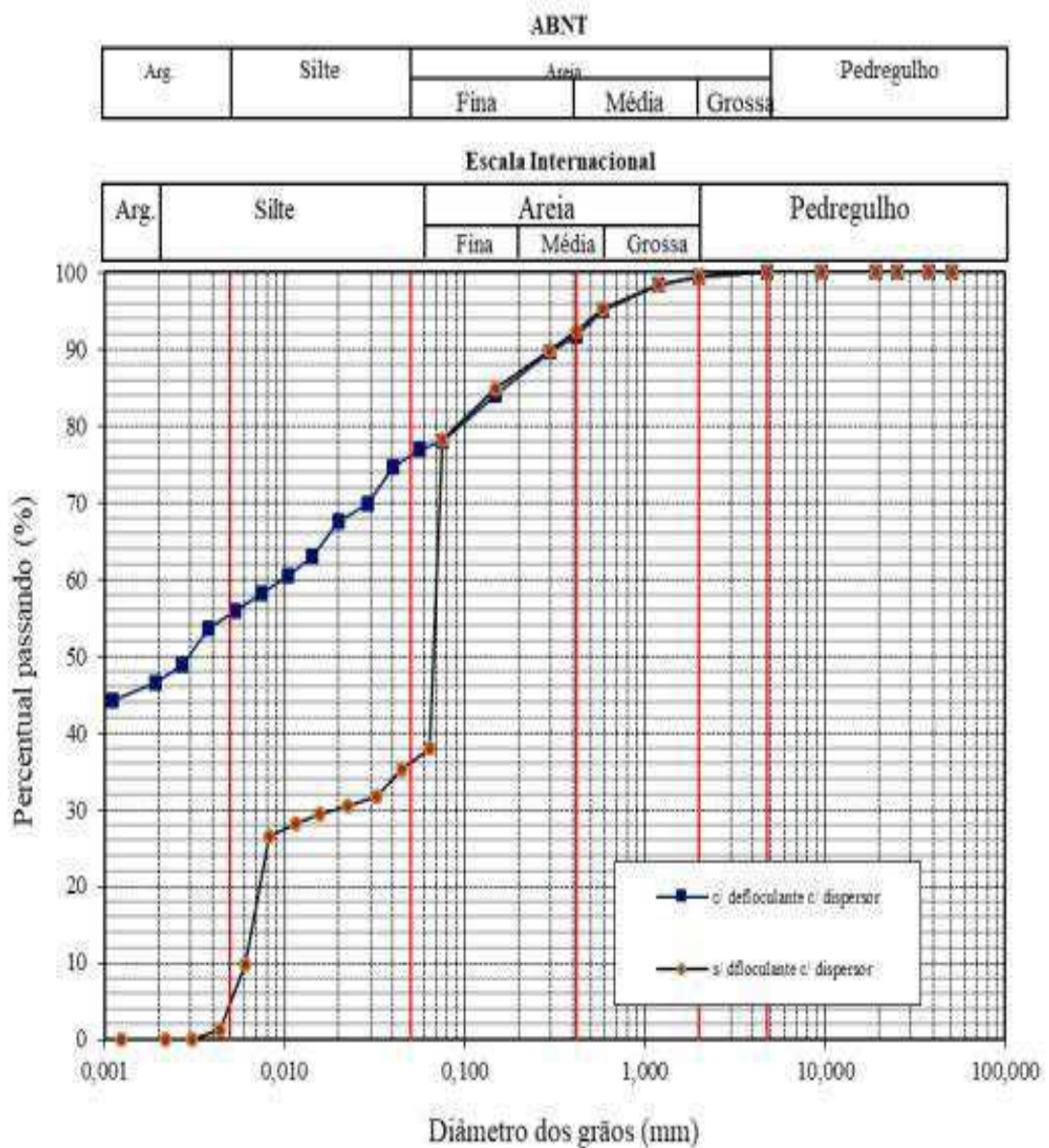
Quando feito a leitura dos três corpos de prova de cada porcentagem de cimento, era feita a média aritmética das deformações de pico dos três corpo de prova. Se algum corpo de prova apresentasse uma dispersão de  $\pm 10\%$  da média, esse corpo de prova era descartado e a média aritmética era recalculada.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 – CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Após ser feito os ensaios e os cálculos, pôde-se gerar a curva de granulometria do solo, conforme a Figura 18.

Figura 15: Curva granulométrica com o solo utilizado.



Fonte: o próprio autor (2019).

A Tabela 3 ajuda a compreender melhor a curva de granulometria mostrada acima, os espaços da tabela foram divididos a partir das orientações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Tabela 3: Composição Granulométrica a partir da ABNT .

<b>Fração</b>	<b>Tamanho</b>	<b>% de solo</b>
Matacão	25cm < $\phi$ < 1m	0%
Pedra	7,6cm < $\phi$ < 25cm	0%
Pedregulho	4,8mm < $\phi$ < 7,6cm	0%
Areia Grossa	2mm < $\phi$ < 4,8mm	0%
Areia Média	0,42mm < $\phi$ < 2mm	7,70%
Areia Fina	0,05mm < $\phi$ < 0,42mm	15,31%
Silte	0,005mm < $\phi$ < 0,05mm	21,13%
Argila	$\phi$ < 0,005mm	55,86%

A partir dos resultados encontrados, o solo apresentou 55,86% de argila, segundo a ABNT, comprovando sua característica de solo argiloso. Sendo a segunda maior porcentagem a de silte (21,13%). A partir das porcentagens encontradas, também foi possível analisar o tipo de solo pelo Diagrama Trilinear de “Bureau of Public Roads” indicando nele a característica de solo argiloso.

O solo foi considerado bem graduado, com base na sua curva granulométrica, ou seja, apresenta uma boa variação do tamanho de seus grãos. Fazendo com que os grãos menores consigam ocupar os vazios deixados pelos grãos maiores. Ajudando na compactação e fazendo com que tenha uma facilidade maior de apresentar resistências mais altas.

## 5.2 – LIMITES DE ATTEBERG

Com os resultados obtidos utilizando o aparelho de Casagrande, foi possível gerar a curva de fluidez, onde no eixo das abscissas estava os valores para o número de golpes (escala logarítmica) e no eixo das ordenadas estava os valores das umidades correspondentes (escala aritmética). Feito o gráfico, iniciou-se os cálculos e encontrou que o limite de liquidez do solo estudado foi de  $LL = 50\%$ .



Para o ensaio de limite de plasticidade, o resultado foi encontrado após fazer a média de seis valores. Os valores que diferiam em até 5% para mais ou para menos eram excluídos. Com isso, após ser feita a análise e os cálculos, foi encontrado um valor para o limite de plasticidade de solo estudado de  $LP = 21\%$ .

O índice de plasticidade foi calculado fazendo a diferença de valores entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade ( $IP = LL - LP$ ), encontrando um índice de plasticidade para o solo estudado de  $IP = 29\%$ .

Segundo JEKINS (1993), os solos que apresentam um índice de plasticidade maior que 15%, são considerados solos altamente plásticos.

Segundo CAPUTO (1988), a consistência de um solo em seu estado natural, com o teor de umidade  $h$ , é expressa por,  $IC = (LL - h) / IP$ . Feito os cálculos, o índice de consistência encontrado para o solo estudado foi de  $IC = 1,53$ . Classificando a consistência de argila como dura, pois apresentou um valor maior que 1,00.

### 5.3 – ENSAIO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH)

Para o resultado do pH do solo, foram aferidas três vezes o teste, fazendo no final a média dos valores encontrados, conforme a Tabela 5:

Tabela 4: Resultados dos pH encontrados.

Resultado	PH
1	8,24
2	8,29
3	8,16
<b>Média</b>	<b>8,23</b>

Com o pH de 8,23 encontrado, constatou que o solo é tido como alcalino ou básico.

Sabendo que o município de Sousa/PB apresenta longos períodos de estiagem e que a chuva é um elemento importante para determinação do pH do solo, pode-se dizer que a classificação de pH encontrada é coerente com a região onde o solo foi coletado.

#### **5.4 – MASSA ESPECÍFICA E DENSIDADE DOS GRÃOS**

A partir da realização do ensaio e dos cálculos feitos, foi determinada a massa específica dos grãos de solo. Para isso, foi realizada a média dos valores encontrados nos três picnômetros, obtendo uma densidade dos grãos de  $\delta_{20^\circ} = 2,71 \text{ g/cm}^3$ .

#### **5.5 – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO**

Com os resultados de granulometria e Limites de Atteberg obtidos, pode-se fazer a classificação do solo.

Para classificação AASHTO, foi utilizada a porcentagem de solo passante na peneira de N°200, o limite de liquidez, o índice de plasticidade e calculado o índice de grupo do solo. Para o solo estudado, foi encontrado um índice de grupo de  $IG = 17,6$ . Analisando a tabela da AASHTO, foi possível classificar o solo no grupo A-7-6, tendo esse a predominância de argila e seu comportamento é de fraco a pobre.

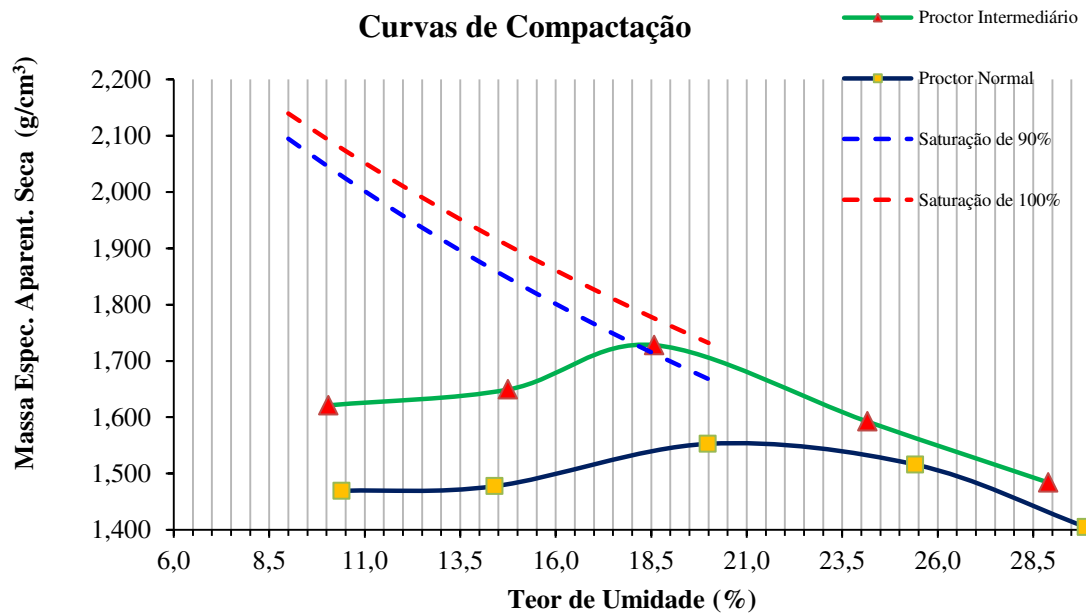
Segundo Senço (2007), os solos do tipo A-7-6 apresentam variações de volume quando sujeitos a variação de umidade, obrigando a substituição desse solo do subleito para garantir estabilidade.

Para fazer a classificação pela SUCS, foi necessária a porcentagem de solo que passa na peneira de N° 200, o valor do limite de Liquidez e o índice de plasticidade, analisando esses fatores, pôde-se observar que a classificação dada era de uma argila inorgânica de baixa a média plasticidade (CL), tendo característica de baixa compressibilidade.

#### **5.6 – ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO**

Foram realizados ensaios de compactação para a energia de proctor normal e a energia de proctor intermediária, criando uma curva de compactação para cada uma das energias. No gráfico abaixo, está apresentado o teor de umidade no eixo das abscissas e a massa específica aparente seca no eixo das ordenadas. Também contem as curvas de saturação para 90 e 100%, conforme Figura 19:

Figura 16: Resultados do ensaio de compactação do solo para a energia de proctor normal e intermediária.



Fonte: o próprio autor (2019).

Foram obtidos três parâmetros para cada energia de compactação, a massa específica seca máxima, a umidade ótima e a energia de compactação aplicada.

Para a energia de proctor normal, obteve uma massa específica seca máxima de 1,57 g/cm<sup>3</sup>, uma umidade ótima de 22% e uma energia de compactação de 5,8 kg.cm/cm<sup>3</sup>.

Para a energia de proctor intermediário, encontrou uma massa específica seca máxima de 1,73 g/cm<sup>3</sup>, uma umidade ótima de 18,6% e uma energia de compactação de 13,63 kg.cm/cm<sup>3</sup>.

## 5.7 – ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

O ensaio de CBR foi realizado com solo natural, a partir dos resultados obtidos, foi feito a média dos maiores valores encontrados para cada cilindro, descobrindo um CBR para o solo natural de 13,13% e uma expansão de 0,195%.

Segundo Baptista (1980), o solo natural não apresenta expansão e é considerado como regular. Em relação a sua resistência, este não apresenta uma resistência suficiente para ser utilizado como base ou sub-base de um pavimento.

## **5.8 – ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES**

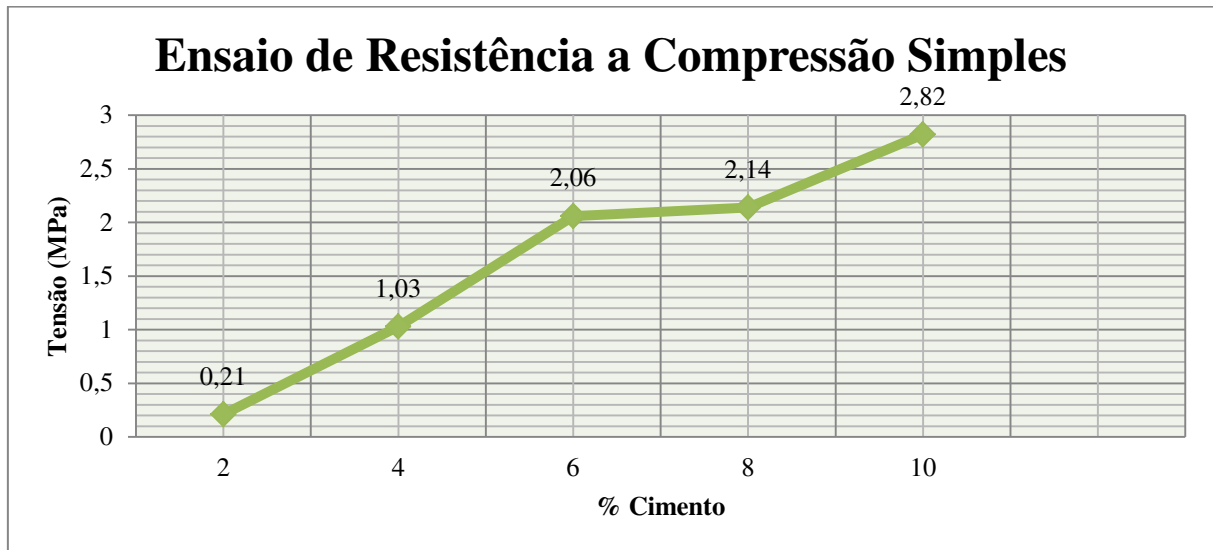
Para o ensaio de compressão simples do solo, foram moldados sessenta e quatro corpos de prova, sendo quatro deles sem nenhum teor de cimento e sessenta com teor de cimento, apresentando variações no tempo de cura, no teor de cimento utilizado e na energia de compactação utilizada.

Os corpos de provas moldados sem cimento quando submersos na água, se desintegraram em poucas horas, fazendo com que não fosse possível rompê-los. Demonstrando que o solo natural somente compactado não apresenta uma boa estabilização.

Os outros sessenta corpos de prova, que apresentavam teores de cimento, não apresentaram este problema de desintegração. Os teores de cimento utilizados neste ensaio foram de 2,0; 4,0; 6,0; 8,0 e 10%. Tempos de cura de sete e quatorze dias e energia de compactação de proctor normal e intermediária.

A partir dos resultados, foram gerados dois gráficos para cada energia de compactação, um gráfico para o tempo de cura de sete dias e outro para quatorze dias. Os resultados das resistências encontradas para a energia de compactação de proctor normal e tempo de cura de sete dias, está demonstrado na Figura 20:

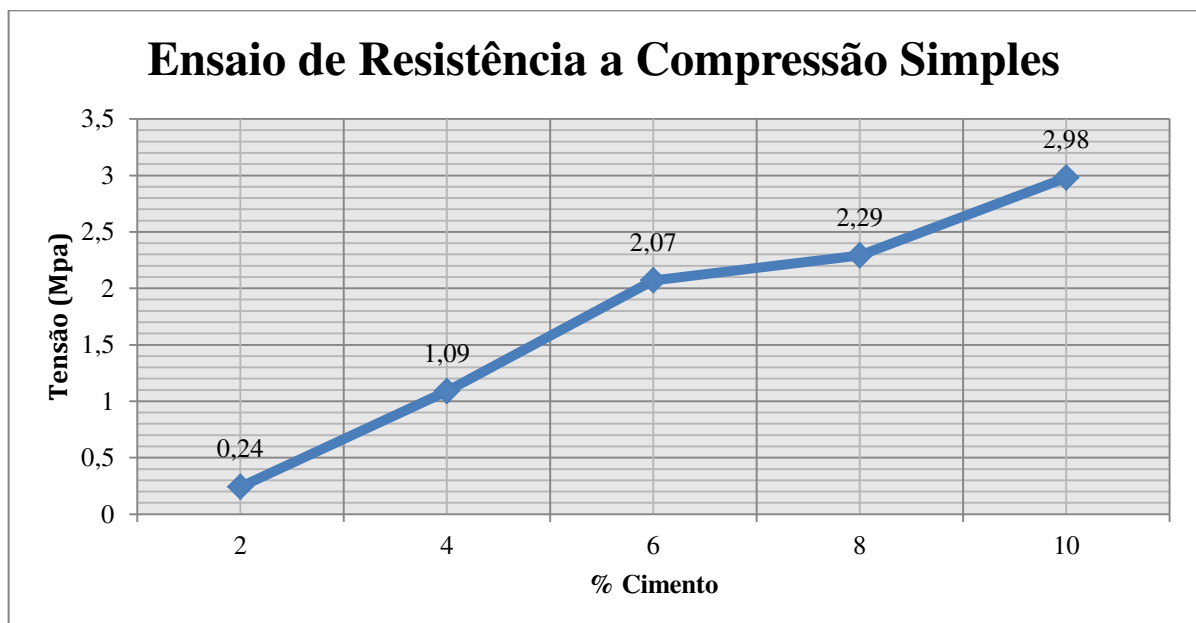
Figura 17: gráfico das tensões para cada teor de cimento utilizado, com tempo de cura de 7 dias.



Fonte: o próprio autor (2019).

Já para o tempo de cura de 14 dias, ocorreu um pequeno aumento na resistência dos corpos de prova, conforme Figura 21:

Figura 18: gráfico das tensões para cada teor de cimento, com tempo de cura de 14 dias.



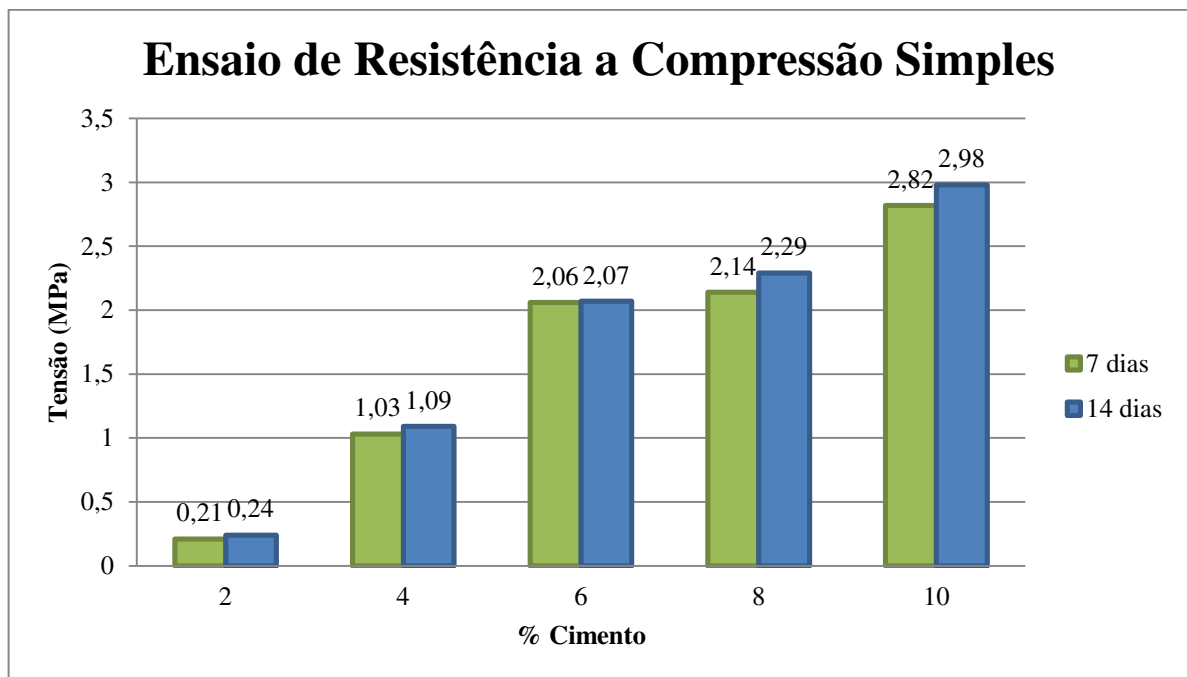
Fonte: o próprio autor (2019).

Foi observado nos dois gráficos, que o solo com cimento conseguiu atingir, nos teores de 8 e 10% de cimento, a resistência mínima proposta pela NBR 12253/92. Para a energia de compactação de proctor normal, o teor de 6% quase alcançou a resistência mínima que a norma propõe.

Como o cimento utilizado era de rápida trabalhabilidade, não teve diferenças muito grandes nas resistências dos tempos de cura utilizadas. Mesmo sabendo que existiria a chance das resistências virem semelhantes, foi adicionado a cura para 14 dias como forma de detalhar mais a pesquisa.

A Figura 22 mostra melhor as diferenças de resistências para os dois tempos de cura da energia de proctor normal:

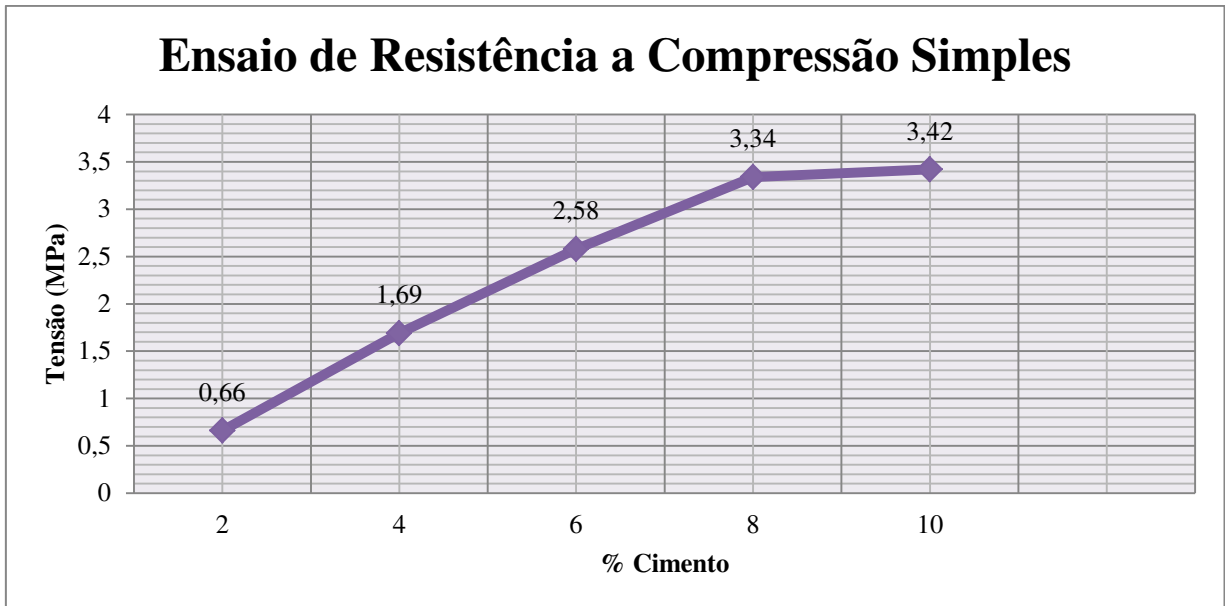
Figura 19: gráfico comparativo das resistências da energia de proctor normal.



Fonte: o próprio autor (2019).

Na compactação para energia de proctor intermediário, ocorreu um aumento na resistência dos corpos de prova, devido a sua maior energia de compactação. A Figura 23 abaixo mostra os valores de resistência para o tempo de cura de 7 dias.

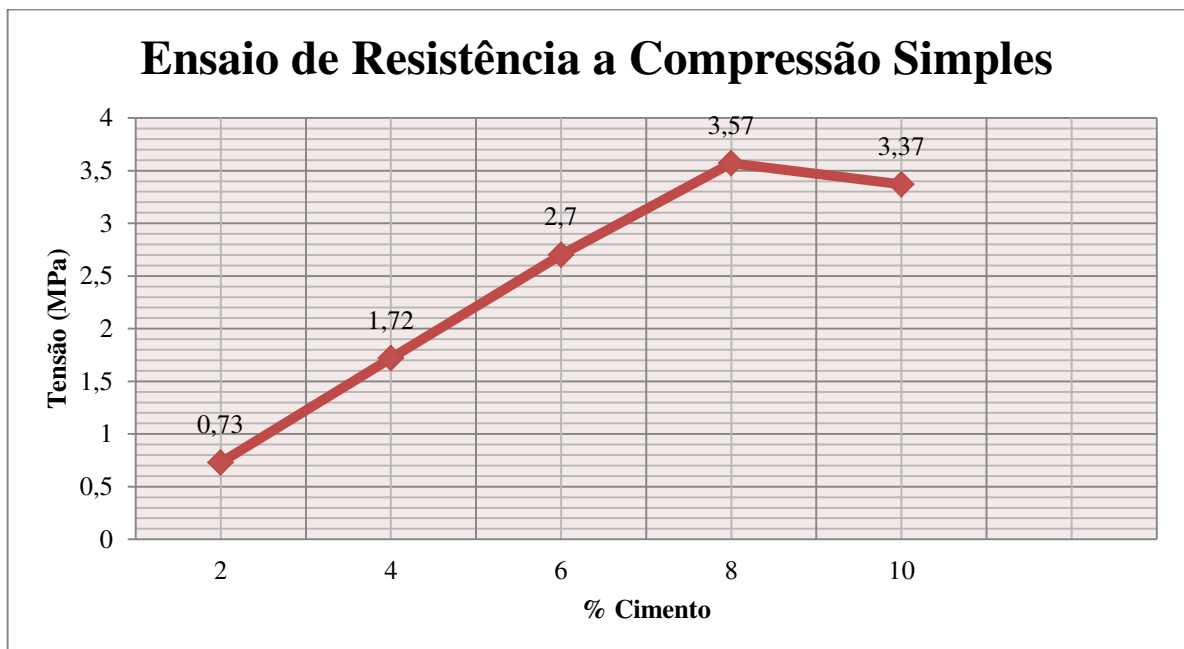
Figura 20: gráfico de resistência para tempo de cura de 7 dias, na energia de proctor intermediário.



Fonte: o próprio autor (2019).

Para o tempo de cura de 14 dias, os corpos de prova tiveram um pequeno aumento na resistência, como tinha acontecido para a energia de proctor normal, e para o teor de cimento de 10% ocorreu uma diminuição da resistência em relação ao teor de 8%.

Figura 21: gráfico da resistência para tempo de cura de 14 dias.

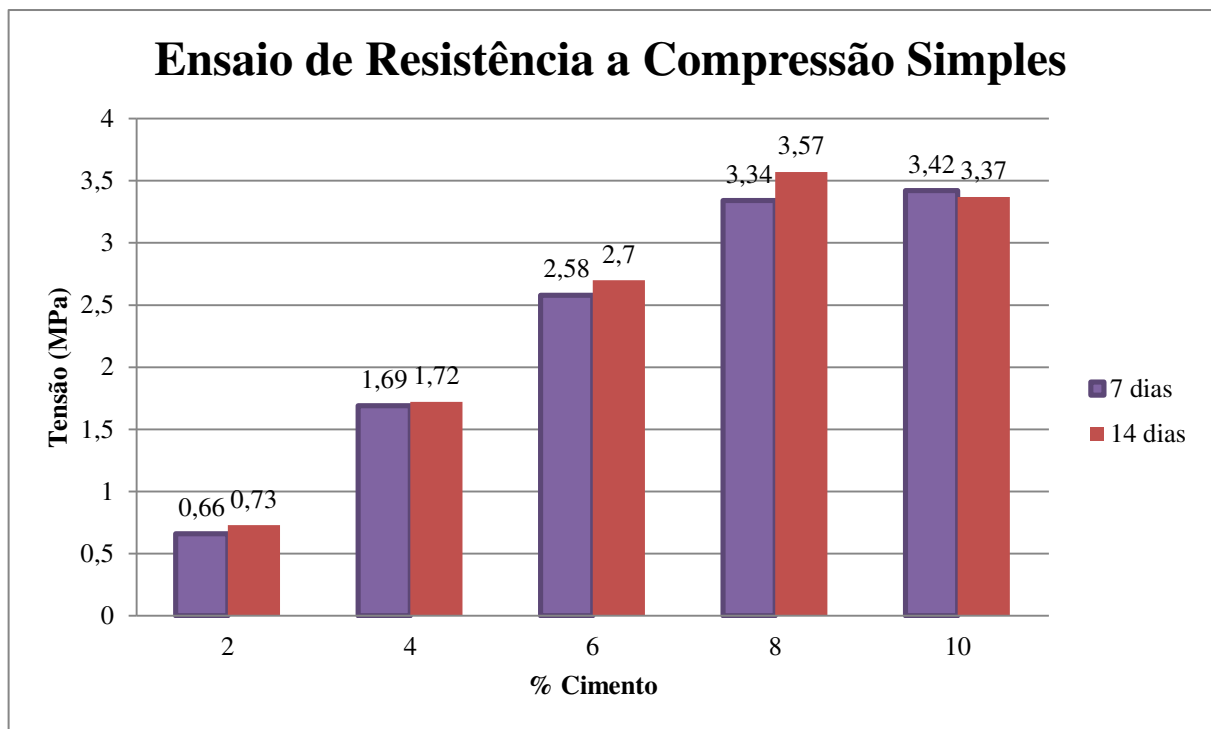


Fonte: o próprio autor (2019).

A resistência dos corpos de prova para energia de proctor intermediário, conseguiu ultrapassar a resistência mínima (2,1 MPa) que a NBR 12253/92 impõe já nos corpos de prova de 6,0% de cimento.

Abaixo está um gráfico comparativo para a energia de proctor intermediário, nos seus dois tempos de cura utilizados:

Figura 22: gráfico comparativo das resistências para energia de proctor intermediário.

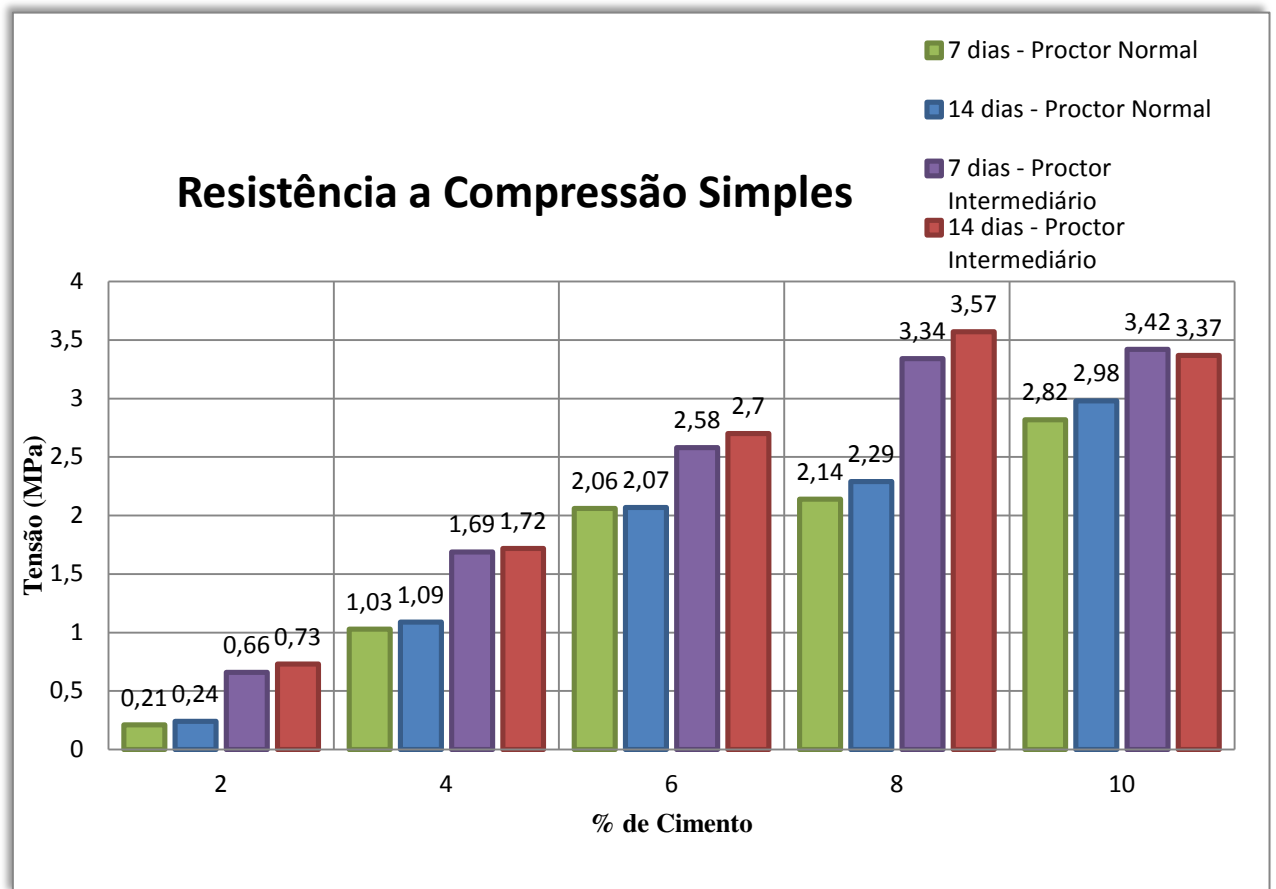


Fonte: o próprio autor (2019).

Na Figura 26, estão todos os valores das resistências encontradas nas duas energias de compactação e nos dois tempos de cura utilizados. Pode-se observar que houve pouca diferença de resistência nos corpos de prova de mesma energia de compactação, esse motivo se deu pelo tipo de cimento utilizado (CP V ARI), que dispõe de uma rápida trabalhabilidade, gerando uma boa resistência com baixo tempo de cura.



Figura 23: gráfico comparativo das resistências encontradas para energia de proctor normal e intermediário, em seus tempos de cura de 7 e 14 dias.



Fonte: o próprio autor (2019).

Segundo INGLES & METCALF (1972), as porcentagens de cimento que deveriam ser utilizadas para a técnica solo-cimento, deveria ser de 8,0 a 15,0% da massa total de solo.

Na pesquisa gerada, percebeu-se que para uma energia de compactação maior (proctor intermediário), as porcentagens de 6,0, 8,0 e 10,0% de cimento atingiram a resistência mínima proposta pela NBR 12253/92 – Solo-Cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento.

## 6. CONCLUSÃO

No trabalho, foi analisado um solo coletado no município de Sousa/PB, que tinha característica de vertissolo e era constituído em sua maior parte de argila. Buscou com isso fazer o melhoramento desse solo utilizando a técnica de solo-cimento, a menor porcentagem de cimento (mais econômica) encontrada para fazer o melhoramento foi de 6,0% na energia de proctor intermediário.

O trabalho também mostrou mais detalhadamente a caracterização desse solo, para facilitar na sua análise, utilizando os ensaios de granulometria, limites de atterberg, compactação do solo, ensaio de CBR, entre outros.

Na região do sertão paraibano, a técnica de solo-cimento ainda não é bem utilizada como forma de melhoramento do solo, o trabalho buscou incentivar o aprofundamento nos estudos, pois dependendo do caso, a técnica pode ser considerada mais viável economicamente, do que a remoção do solo problemático e reaterro do local.

Com isso, pode-se concluir que a proposta de análise e solução para o problema do solo foi cumprida, obtendo sua caracterização e alcançando a resistência mínima de 2,1 MPa estabelecida por norma e descobrindo o melhor teor de cimento a ser utilizado em um solo argiloso do tipo vertissolo (6,0%).

Sugestão para pesquisas futuras:

- Fazer ensaio de compactação para a energia de proctor modificado e moldando os corpos de prova na técnica solo-cimento para descobrir a resistência para essa energia.
- Utilizar materiais na moldagem que possam melhorar a resistência do solo, como por exemplo, o uso de fibras.
- Fazer estudos sobre os efeitos da porosidade e da sucção dos corpos de prova.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – **NBR 7181**. Análise Granulométrica - Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – **NBR 12025**. Compressão Simples em Corpos de Prova Cilíndricos - Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – **NBR 6459**. Determinação do limite de liquidez – Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – **NBR 7180**. Determinação do limite de plasticidade - Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – **NBR 12253**. Solo cimento – Dosagem para emprego como base de pavimento – Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – **NBR 7182**. Solo – Ensaio de compactação – Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – **NBR 9895**. Solo – Índice de Suporte Califórnia – Rio de Janeiro, 1987.
- BAPTISTA, C.N. **Pavimentação: Tomo I**. 4ª edição. Porto Alegre. Ed. Globo, 1980
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Volume 1, 6ª edição. – Rio de Janeiro, 2008.
- CERATTI, J. A. P.; CASANOVA, F.J. **Um método físico químico para Dosagem de Solo-Cimento**. Simpósio sobre novos conceitos em ensaios de campo e laboratório em geotecnia. Rio de Janeiro, 1988.
- CHANG, T.; WOODS, R.D. **Effect of particle contact bond on shear modulus**. – New York, 1992.
- CONSOLI, N.C. **Revista Luso-Brasileira**. N° 125, 2012.
- COOP, M.R.; ATKINSON, J.H. **The Mechanics of Cement Carbonated Sands**. Londres, 1993.

DNIT (2006). **Manual de Pavimentação**. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte. Rio de Janeiro.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000.

FOOPA, D. **Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GENS, A.; NOVA, R. **Conceptual base for a constitutive model for bonded soils and weak rocks** – Rotterdam, 1993.

GUEDES, S. B. **Estudo do Desempenho Mecânico de um Solo-Cimento Microreforçado com Fibras Sintéticas para uso como Revestimento Primário em Estradas não Pavimentadas**. Tese (Doutor em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

INGLES, O.G.; METCALF, J.B. **Estabilização de solo: princípios e práticas**. – Sydney, 1972.

LADE, P. V.; OVERTON, D. D. **Cementation Effects in Frictional Materials**. *Jornal de Engenharia Geotécnica*, New York. 1989.

MACCARINI, M. **Estudo da quebra de cimentação de um solo artificial**. – Porto Alegre, 1989.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION – PCA. **Soil-Cement**. 2004.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 1<sup>o</sup> edição, São Paulo: PINI. 2001.