



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS PROFESSORA MARIA DA PENHA  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ITALO ANDRADE VASCONCELOS**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO  
NATURAL E TRATADO COM CAL PARA FINS DE FUNDAÇÃO**

**ARARUNA  
2016**

**ITALO ANDRADE VASCONCELOS**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO  
NATURAL E TRATADO COM CAL PARA FINS DE FUNDAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Graduação em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Geotecnia.

**Orientador:** Prof. Dr. Raimundo Leidimar Bezerra.

**ARARUNA  
2016**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

V331a Vasconcelos, Italo Andrade

Avaliação da resistência à compressão simples de um solo natural e tratado com cal para fins de fundação [manuscrito] / Italo Andrade Vasconcelos. - 2016.

32 p. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em ENGENHARIA CIVIL) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Tecnologia e Saúde, 2016.

"Orientação: Prof. Doutor. Raimundo Leidimar Bezerra, Departamento de Engenharia civil".

1.Solo. 2. Cal. 3.Resistência. I. Título.

21. ed. CDD 624.189



ITALO ANDRADE VASCONCELOS

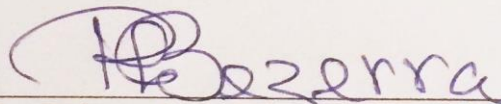
AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO  
NATURAL E TRATADO COM CAL PARA FINS DE FUNDAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso em  
Engenharia civil da Universidade Estadual da  
Paraíba, como requisito parcial à obtenção do  
título de Graduação em Engenharia Civil.

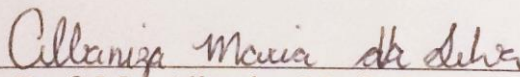
Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 04/14/2016

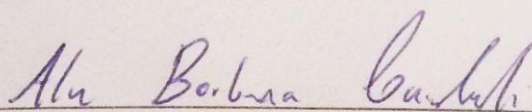
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Raimundo Leidimar bezerra (Orientador)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Albaniza Maria da Silva  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Alan Barbosa Cavalcanti  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Aos meus familiares, pelo amor, companheirismo e  
confiança, DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu forças para continuar nesta caminhada e que esteve sempre comigo em todos os momentos em que precisei.

Aos meus pais, Ionalda Lopes e Fabio Arnaud, que sempre me motivaram nos momentos em que eu fraquejava, além de me proporcionar, financeiramente, mais esta etapa em minha vida.

Aos meus avós, em especial José Guedes por ter orgulho de mim e que apesar do seu jeito duro, amava a todos.

Aos meus tios por todo o carinho e incentivo que sempre foi dado. Em especial, Inaldo Lopes de Andrade e Socorro Vasconcelos.

Ao meu professor orientador, Raimundo Leidimar, por ter disponibilizado todo o conhecimento necessário e mostrado sempre disponível quando precisei.

Aos de sala a qual sempre me ajudaram e foram capazes de arrancar um sorriso meu mediante a momentos difíceis. Em especial, Yuri Tomaz, Romulo Thomaz, Jacilândio Adriano.

Ao meu grupo de estudos, o Carcará, que mostraram o verdadeiro sentido da amizade onde o companheirismo e as noites em claro estudando possibilitou com que eu concluísse este sonho em minha vida.

Aos laboratoristas da ATECEL e da UNIPE, pelo auxílio na elaboração desta monografia, assim como sua atenção para comigo.

Aos meus amigos ao longo da caminhada pela ajuda e companhia durante esses anos. Em especial, Alex Pereira, Yuri Rodrigues, Jonathas Nóbrega, Walfredo Juno, Zenobia Sousa.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para  
recomeçar com mais inteligência.”

Henry Ford



## RESUMO

O solo é um elemento de grande relevância para a Engenharia Civil, sendo ele quem suporta todas as cargas da superestrutura. Devido ao seu processo de formação, como também, dependendo da sua rocha de origem, o solo possui composições químicas e mineralógicas diversas, podendo o mesmo não ser capaz de absorver e dissipar tais cargas sem que ocorra prejuízo à obra. Cabendo ao engenheiro encontrar soluções com baixo custo e boa eficiência, como, por exemplo, as estabilizações químicas, que consiste, na adição de um produto que altere as características do solo com a finalidade de melhorar as propriedades desejadas. Mediante isso, o presente trabalho teve como principal objetivo analisar a resistência à compressão simples de uma amostra de solo estabilizada quimicamente com o uso de 4% de cal hidratada, dosagem esta recomendada para o tipo de solo em estudo. Foram moldados corpos de prova, em triplicata, tanto do solo natural como do solo tratado com cal para os tempos de cura de três e sete dias; tal tempo é dado para que as reações pozolânicas pudessem se efetivar, já que a estabilização com cal é um processo lento que pode durar até 28 dias. Foi possível observar, pelos resultados encontrados, que o solo estabilizado com cal apresentou um ganho de aproximadamente 5% na resistência à compressão simples com três dias de cura e de 57% com sete dias de cura. Pode-se concluir, baseado nos resultados, que a estabilização com cal representou um ganho significativo na resistência do solo, sendo uma forma eficaz e, na maioria dos casos, de baixo custo para a melhoria do solo.

**Palavras chaves:** Solo. Estabilização com cal. Resistência à compressão simples.

## **ABSTRACT**

Soil is an element of enough significance to civil engineering, it is who bears all the charges of the superstructure. Due to its formation process, but also, depending on their source rock ground has several different chemical and mineral composition, the same may not be able to absorb and dissipate such charges occurs without prejudice to the work. Hence, it enters the tool engineer to find solutions with low cost and good efficiency, for example, chemical stabilization, which consists in adding a product that changes the characteristics of the soil in order to improve the desired properties. Through this, the present study aimed to analyze the unconfined compression strength of a stabilized soil sample chemically with the use of 4% hydrated lime, this dosage recommended for the type of soil under study. Specimens were molded in triplicate, both natural soil and the soil treated with lime to curing times of three and seven days; this time is given for the pozzolanic reactions could accomplish, since the lime stabilization is a slow process that can last up to 28 days. Where it was possible to analyze the results found that the soil stabilized with lime there was a gain of approximately five percent in compressive strength with three days of cure and 57% cure after seven days. As can be concluded, based on the data, the lime stabilization represented a significant gain in resistance, one form of low cost and very effective for improving the soil.

**Keywords:** Ground. Lime stabilization. Unconfined compression strength

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Transmissão de carga da fundação para o solo.....	15
Figura 2 – Modelo de estabilização do solo.....	19
Figura 3 – Fluxograma de nomes de grupos para solos inorgânicos com argila e silte.....	21
Figura 4 – Fluxograma de nomes de grupos de solo com pedregulho e areia.....	24
Figura 5 – Fluxograma de nomes dos grupos para solos orgânicos siltosos e argilosos...	25
Figura 6 – Retirada da amostra indeformada.....	25
Figura 7 – Dosagem de cal hidratada.....	26
Figura 8 – Amostra do solo natural.....	29
Figura 9 – Caixote com as amostras de solo-cal.....	29

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Teor de cal de acordo com a classificação do solo.....	20
<b>Tabela 2</b> – Classificação de acordo com a SUCS.....	23
<b>Tabela 3</b> – Ensaio de granulometria.....	27
<b>Tabela 4</b> – Resultado dos limites de Atterberg.....	28
<b>Tabela 5</b> – Dados de resistência do solo natural.....	30
<b>Tabela 6</b> – Resultados de resistência do solo-cal conforme o tempo de cura.....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASTHO American Association of State highway Transportation Officials

CP Corpo de prova

LL Limite de liquidez

LP Limite de plasticidade

NBR Norma brasileira

PB Paraíba

pH Potencial hidrogeniônico

SUCS Sistema Unificado de Classificação dos Solos

USDA United State Department of Agriculture

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO.....</b>	<b>14</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
3.1. FUNDAÇÕES.....	14
<b>3.1.1.Fundação superficial .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1.2.Fundação Profunda .....</b>	<b>15</b>
3.2. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	16
3.3. CAL.....	16
3.4. SOLO-CAL.....	18
3.5. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO.....	20
<b>3.5.1.Classificação da SUCS.....</b>	<b>21</b>
<b>4. ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>24</b>
<b>5. METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
<b>6. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>25</b>
6.1. PENEIRAMENTO .....	25
6.2. LIMITES DE ATTERBERG.....	26
6.3. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO.....	26
6.4. DOSAGEM.....	27
6.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO NATURAL.....	27
6.6. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO-CAL.....	28
<b>7. CONCLUSÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>8. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>30</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>31</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As rochas, existentes na crosta terrestre, conforme Braja (2013), podem ser divididas em basicamente três tipos: ígneas, sedimentares e metamórficas, que variam entre si de acordo com os minerais constituintes e dependem da região e do meio em que estão localizadas. Ao longo de suas vidas, as rochas sofrem um processo conhecido como intemperismo, podendo ser físico ou químico, dando origem ao solo, que consiste no maior material utilizado na engenharia geotécnica.

Conforme Pinto (2013), o solo consiste em uma mistura de pequenas partículas diferenciadas, entre si, pelo tamanho e por sua composição química. O solo tem uma função fundamental nas obras de engenharia que consiste em receber e suportar todas as cargas advindas da superestrutura.

Porém, nem sempre o solo está apto a suportar toda a carga nele aplicada, devido a sua baixa resistência ou acentuada deformabilidade, cabendo ao engenheiro solucionar este problema. Atualmente existem diversos métodos para a melhoria do solo para sua utilização como base para fundação, podendo realizar a substituição do solo por um que atenda melhor às condições propostas pelo projeto, aceitar as condições do solo natural e projetar a estrutura para atuar nele, ou alterar as propriedades do solo para assim criar um novo material e é neste último que se enquadra a estabilização química com a cal, sendo este, o foco do estudo deste trabalho.

O solo-cal tem uma grande qualidade no que diz respeito a seu custo, porém não existe um método padronizado para a sua dosagem.

Mediante ao apresentado, o respectivo trabalho tem como objetivo comparar os valores da resistência à compressão simples de um solo natural com um solo estabilizado com cal, dosado de acordo com a proposta de Ingles e Metcalf (1972).

## **2. OBJETIVO**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Comparar a resistência a compressão simples de um solo reforçado com cal e o solo natural.

### **2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO**

- Realizar o ensaio de Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade;
- Elaborar o gráfico de distribuição granulométrica;
- Classificar o solo em estudo por meio do sistema universal de classificação;
- Dosar o solo conforme Ingles e Metcalf (1972);
- Moldar três corpos de prova para cada tempo de cura, assim como, para o solo natural.
- Comparar a resistência a compressão simples do solo melhorado com cal e do solo natural, para diferentes tempos de cura.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O estudo tratará dos aspectos teóricos para o entendimento da utilização da cal para a estabilização de solos para fins de fundação, enfatizando sua aplicação para o aumento da resistência mecânica do solo em estudo.

### **3.1. FUNDAÇÕES**

A fundação em uma obra tem como principal finalidade suportar e transmitir as cargas advindas da superestrutura para o solo, cabendo ao mesmo suportar tal esforço.

As fundações podem ser divididas em superficiais ou profundas, onde a NBR 6122/2010 define como fundações superficiais, todas as fundações em que sua parte recoberta por solo seja inferior a duas vezes a sua menor dimensão e fundação profunda tendo a sua profundidade de assentamento o dobro da sua menor dimensão, sendo no mínimo de 3 metros.

#### **3.1.1. Fundação superficial**

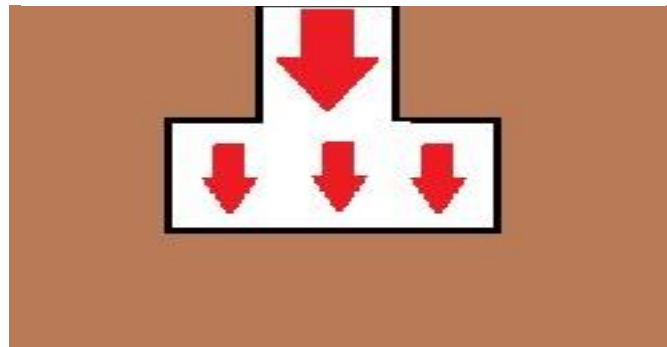


As fundações superficiais podem ser divididas, segundo a NBR 6122(2010) em:

- Bloco – elemento de concreto simples, dimensionado de modo que as tensões de tração nele resultantes sejam resistidas pelo concreto, sem necessidade de armadura;
- Sapata - elemento de concreto armado, dimensionado de modo que as tensões de tração nele resultantes sejam resistidas pelo emprego de armadura especialmente disposta para esse fim;
- Sapata corrida – sapata sujeita à ação de uma carga distribuída linearmente ou de pilares ao longo de um mesmo alinhamento;
- Sapata associada – sapata comum a mais de um pilar;
- Radier - elemento de fundação que abrange todos os pilares de uma estrutura, distribuindo os carregamentos.

Neste tipo de fundação a transmissão de carga se dá pela sua base comprimindo o solo no contato fundação-solo, sendo desprezível a resistência lateral.

Figura 1 – Transmissão de carga da fundação para o solo.



### 3.1.2. Fundação Profunda

Já as fundações profundas são divididas em dois grupos, segundo a NBR6122 (2010):

- Estaca- elemento de fundação executado inteiramente por equipamentos ou ferramentas, sem que em qualquer fase de sua execução haja descida de pessoas. Os materiais empregados podem ser: madeira, aço, concreto pré-moldado, concreto moldado *in loco* ou pela combinação dos anteriores;
- Tubulão – elemento de fundação, escavado no terreno em que, pelo menos na sua etapa final, há a descida de pessoas, que se faz necessária para executar o alargamento

de base ou pelo menos a limpeza do fundo da escavação, uma vez que neste tipo de fundação as cargas são transmitidas pela base.

A fundação profunda transmite a carga ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, devendo sua ponta ou base estar assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3,0 m.

### 3.2. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Alterar as características e propriedades do solo com a finalidade de aumentar sua resistência, reduzir a compressibilidade, assim como a sensibilidade à ação de variações externas com finalidade de melhorar seu comportamento, compõe o conjunto de características de um solo estabilizado (CARMO, 2015, p.18).

O solo nem sempre está apto a suportar as cargas advindas da fundação, pois o mesmo pode possuir baixa resistência, cabendo ao engenheiro recorrer a métodos para melhorar o solo e, conseqüentemente, conseguir sua estabilização.

Dentre as possíveis medidas a serem tomadas, têm-se Medina (1987 *apud* SOLIZ, 2007):

- evitar o terreno com solo problemático;
- substituição de um solo não desejado por outro com uma maior resistência;
- projetar a superestrutura para trabalhar neste solo problemático;
- estabilização do solo.

Para a estabilização de solos existem os métodos mecânicos, físicos e químicos. Os métodos para estabilização mecânica vão desde a compactação do solo até a estabilização granulométrica do mesmo.

Os processos físicos, segundo Soliz (2007), se parecem bastante com os métodos mecânicos, onde ocorre a mistura de solos com distribuição granulométrica diferente.

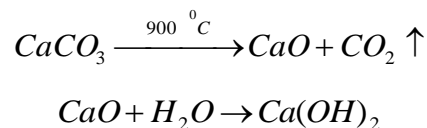
A estabilização química consiste na adição de uma substância que possa alterar a resistência mecânica, a permeabilidade e a deformabilidade do solo. Dentre as substâncias que podem ser adicionadas as principais são a cal, o cimento e o betume Santos et al. (1995).

### 3.3. CAL

A cal é formada a partir da calcinação das rochas calcárias que possuem como principal componente o carbonato de cálcio. Segundo Coutinho (2002), a formação da cal depende basicamente da temperatura utilizada na calcinação, assim como o grau de argila que pode vir a existir nas rochas calcárias; tendo em vista que durante o processo de formação das rochas as argilas podem fazer parte da constituição das mesmas por sedimentação.

Podem ser obtidos dois tipos de cal, conforme seu tipo de enrijecimento (COUTINHO, 2002):

- a cal aérea é aquela em que o seu enrijecimento se dá por meio do contato com o dióxido de carbono, podendo ser obtida através da cal viva ou da cal extinta, sendo a primeira produto da calcinação a cerca de 900°C da rocha calcária com até 5% de argila, e a última obtida pela hidratação da cal viva .



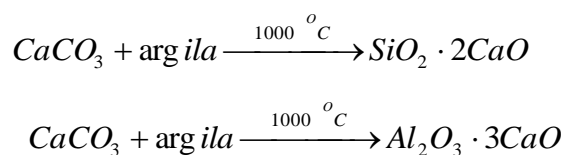
Onde:

$\text{CaCO}_3$  = Carbonato de cálcio;

$\text{CaO}$  = Óxido de cálcio (cal viva);

$\text{Ca(OH)}_2$  = Cal extinta;

- cal hidráulica que, diferentemente da cal aérea, após ser endurecida pelo efeito da água ela não se dissolve na mesma, sendo o seu processo de endurecimento parecido com o do cimento convencional, porém, com uma resistência mecânica menor. Este tipo de cal possui um elevado teor de argila em sua composição, cerca de 20%, necessitando de um calor de aproximadamente 1000°C para que ocorra a sua formação.



Onde:

$\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$  = Silicato de cálcio;



As reações acima mostram o produto formado pela interação entre o carbonato de cálcio, a sílica e alumina presentes na rocha calcária.

#### 3.4. SOLO-CAL

Quando se visa a necessidade de melhorar o solo pode-se recorrer à estabilização por acréscimo de aglutinantes. Aplicando-se ao solo uma substância que o impermeabilize e aumente sua coesão (CAPUTO, 2000 *apud* CORTELETI, 2013).

A utilização da cal consiste em uma estabilização química. Como foi citado acima, a cal tende a alterar as propriedades do solo, aumentando assim sua resistência mecânica e o pH do solo.

A técnica de estabilização com cal tem observado um grande uso em obras de pavimentação, como é apresentado por Guimarães (2002 *apud* CORTELETI, 2013) em obras brasileiras, como por exemplo:

- Aeroporto de Congonhas (São Paulo), onde o solo apresentou uma resistência à compressão simples de 1,5 MPa aos 28 dias;
- Rodovia Brasília/Fortaleza, com base de 1% e 3% de cal, e sub-base em solo laterítico;
- Avenida Sernambetiba (Rio de Janeiro, Guanabara) ;utilizou solo- cal com teores de cal por volta dos 4%.

Porém, a técnica de solo-cal pode ser utilizada em fundações de edificações com pequeno porte, para solos com baixa capacidade de suporte Corteleti (2013).

A utilização da cal altera as seguintes propriedades do solo, de acordo com Soliz (2007):

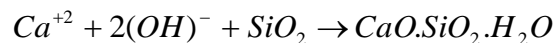
- distribuição granulométrica: ocorre um aumento do tamanho dos grão, quanto mais fino for o solo mais acentuado é observado esse efeito;
- plasticidade: o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) decrescem e crescem, respectivamente, com o aumento de teor de cal;
- compactação: aumento da umidade ótima e diminuição da densidade;

- resistência: aumento da resistência do solo, analisando o ensaio de compressão simples.

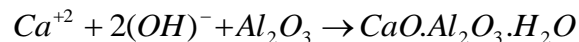
Segundo Benetti (2015), a interação da cal com as partículas de solo se dá através das reações pozolânicas, onde ocorre a cimentação das partículas, aumentando a resistência do solo. Vale ressaltar que a cimentação das partículas é um processo lento e que a estabilização química de solos com a utilização de cal deve ser utilizada preferencialmente em solos argilosos devido à interação da cal com os argilos-minerais (sílica e alumina).

A reação que ocorre na interação solo-cal se dá devido à hidratação da cal viva, obtendo o hidróxido de cálcio que reage com a sílica e a alumina do solo formando silicato hidratado de cálcio e aluminato hidratado de cálcio, respectivamente, sendo representado abaixo:

- reação da sílica com o hidróxido de cálcio:



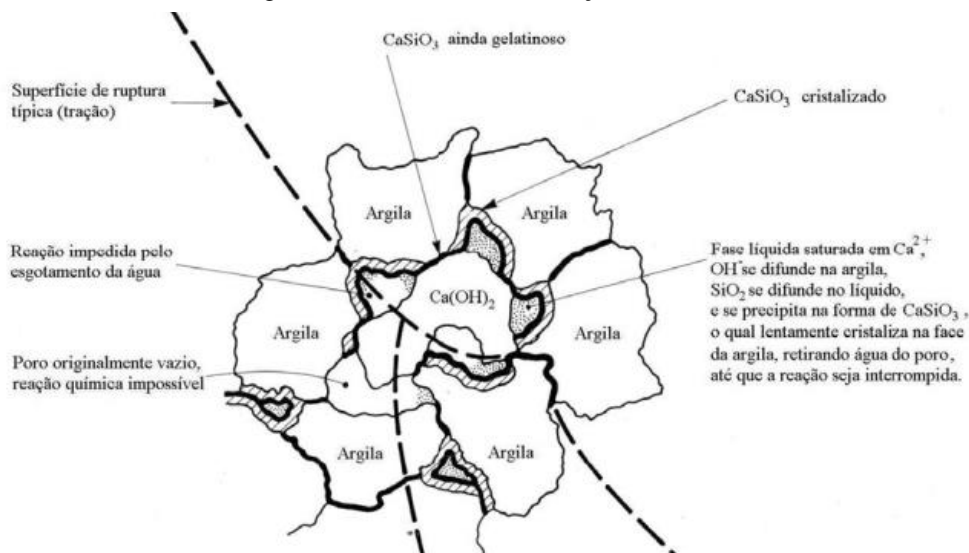
- reação do aluminato com o hidróxido de cálcio:



As reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica de misturas solo-cal. Esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes (LOVATO, 2004, p.53).

Na Figura 2 podem-se observar de forma microscópica as partículas de solo floculadas após o contato com a cal, formando assim os compósitos já citados anteriormente (AZEVEDO PINTO, 2010).

Figura 2 - Modelo de estabilização do solo.



Fonte : Adaptado de Ingles e Metcalf (1992)

Com relação ao tempo de cura, Wesseling (2002 *apud* CORTELETTI, 2013) relata que através de estudos realizados, o tempo de cura aonde se obteve uma maior resistência foi no período que compreendeu 7 a 28 dias.

Uma problemática na utilização da cal como material de estabilização de solos está na sua dosagem, visto que não existe, até o presente momento, uma norma que possa auxiliar; sendo adotados por meio de experimentos “in loco” até obter a dosagem adequada. No presente trabalho será adotada a dosagem sugerida por Ingles e Metcalf (1972 *apud* BENETTI, 2015), conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Teor de cal de acordo com a classificação do solo.

TIPO DE SOLO	TEOR DE CAL PARA A MODIFICAÇÃO	TEOR DE CAL PARA A ESTABILIZAÇÃO
Pedra finamente britada	2 – 4	Não recomendado
Pedregulho argiloso bem graduado	1-3	$\geq 3$
Areias	Não recomendado	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado	$\geq 5$
Argila siltosa	1-3	2-4
Argilas	1-3	3-8
Solos orgânicos	Não recomendado	Não recomendado

Conforme (SOLIZ, 2007, p.27)“Quanto maior o teor de cal maior a troca catiônica e formação de produtos cimentantes, mas não existe um teor ótimo de cal a ser adotado para todos os solos, sendo a experiência de campo decisiva para a escolha do teor de cal.”

### 3.5. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

Os sistemas de classificação fornecem uma linguagem simples para expressar de forma concisa as características dos solos, que são infinitamente variadas, sem descrições detalhadas. A maioria dos sistemas de classificação que foram desenvolvidos para fins de engenharia tem como base propriedades de índices simples, como a distribuição granulométrica e a plasticidade (BRAJA, 2013, p.83).

Hoje em dia existem três sistemas para classificar o solo que possuem o maior uso: a classificação textural, sistema de classificação da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS); sendo as duas ultimas com o maior uso para engenharia no Brasil.

### 3.5.1. Classificação da SUCS

Este método de classificação foi proposto por Arthur Casagrande para ser utilizado em campos de aviação durante a segunda guerra mundial. Após ser revisado ele passou a ser amplamente utilizado pelos engenheiros; este foi o método de classificação utilizado no presente trabalho para a classificação do solo em estudo.

A Classificação da SUCS divide o solo em dois grandes grupos os que têm 50 % retido na peneira nº 200, ou seja, materiais de granulometria grossa e os que passam mais da metade do solo na mesma peneira, sendo eles materiais de granulometria fina. A Tabela 2 foi adaptada de Braja (2013).

Tabela 2 - Classificação de acordo com a SUCS.

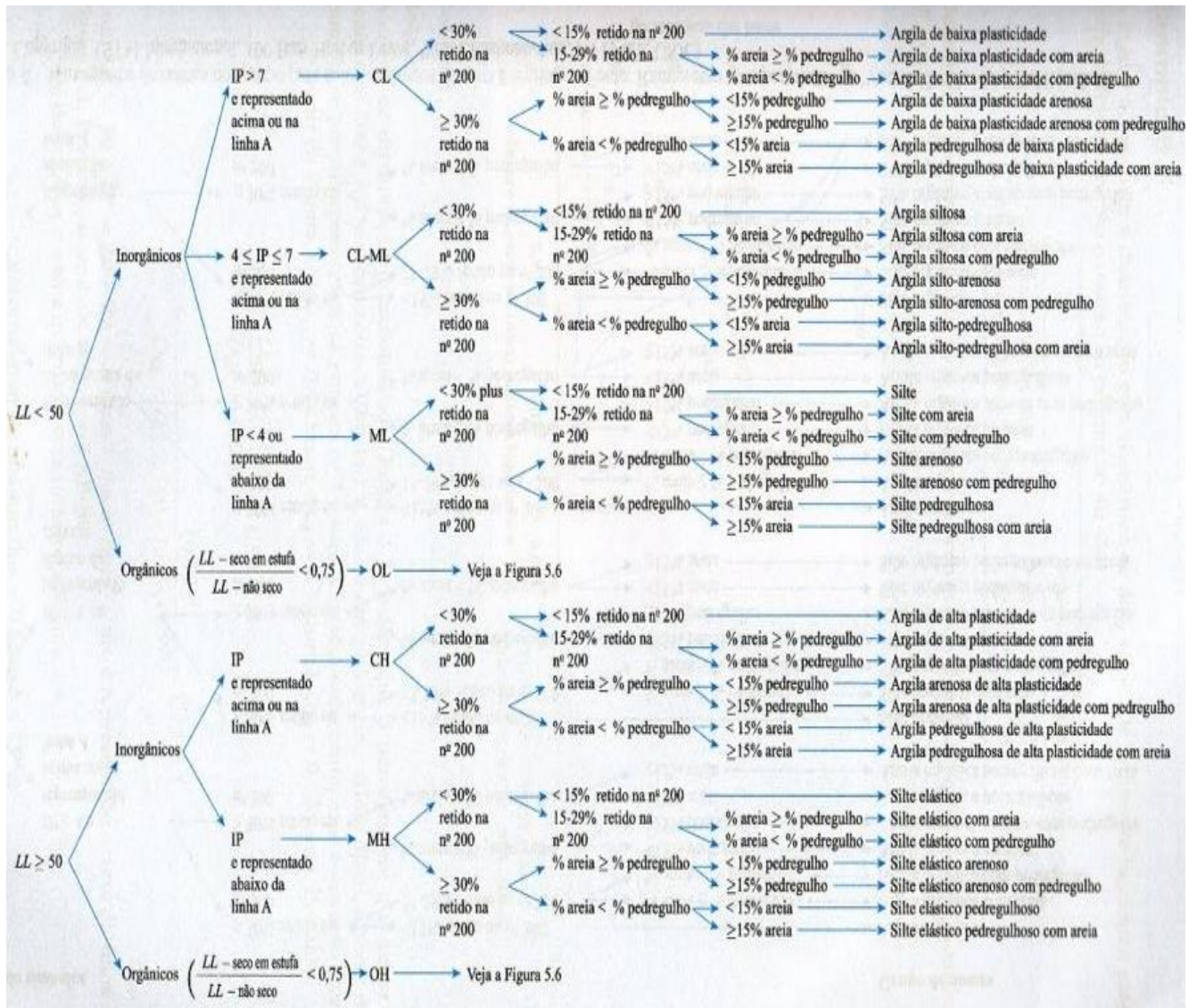
<b>Solos grossos</b> (mais de 50% do material retido na peneira nº200)	<b>Pedregulho</b> (mais de 50% da fração grossa retido na peneira de nº4)	<b>Pedregulhos puros</b> (menos de 5% de finos)	$C_u \geq 4$ e $1 \leq C_c \leq 3$	<b>GW</b>
			$C_u < 4$ e $1 > C_c > 3$	<b>GP</b>
		<b>Pedregulhos com finos</b> (mais de 12% de finos)	$IP < 4$	<b>GM</b>
			$IP > 7$	<b>GC</b>
	<b>Areias</b> (50% o mais da fração grossa passa pela peneira nº4)	<b>Areias puras</b> (menos de 5% de finos)	$C_u \geq 6$ e $1 \leq C_c \leq 3$	<b>SW</b>
			$C_u < 6$ e/ou $1 > C_c > 3$	<b>SP</b>
<b>Areias com finos</b> (Mais de 12% de finos)		$IP < 4$	<b>SM</b>	
		$IP > 7$	<b>SC</b>	
<b>Solos finos</b> (50% ou mais do material passa pela peneira nº 200)	<b>Siltes e argilas</b> (Limite de liquidez menor que 50)	<b>Inorgânicos</b>	$IP > 7$	<b>CL</b>
			$IP < 4$	<b>ML</b>
		<b>Orgânicos</b>	$\frac{LL - \text{Seco em estufa}}{LL - \text{não seco}} < 0,75$	<b>OL</b>
	<b>Siltes e argilas</b> (Limite de liquidez de 50 ou mais)	<b>Inorgânicos</b>	$IP > 0,73(LL - 20)$	<b>CH</b>
			$IP < 0,73(LL - 20)$	<b>MH</b>
		<b>Orgânicos</b>	$\frac{LL - \text{Seco em estufa}}{LL - \text{não seco}} < 0,75$	<b>OH</b>

Para completar a Tabela 2, Braja (2013) ainda resalta algumas orientações, dentre elas:

- Pedregulho com numero de finos entre 5% a 12% exige classificação com dois símbolos: GW-GM, GW-GC, GP-GM ou GP-GC;
- Para areias que contenham entre 5% a 12% de finos deve-se classificar em: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC;
- Pedregulho com IP entre 4 e 7, deve ser classificado GC-GM;
- Areias com o IP entre 4 e 7 a classificação é SC-SM ;
- Para siltes e argilas que contêm IP entre 4 e 7 é classificado em CL-ML.

Após definido a simbologia e com o auxílio das Figuras 3, 4 ou 5, retiradas de BRAJA (2013), é possível determinar o tipo de solo em estudo.

Figura 3 - Fluxograma de nomes de grupos para solos inorgânicos com argila e silte.

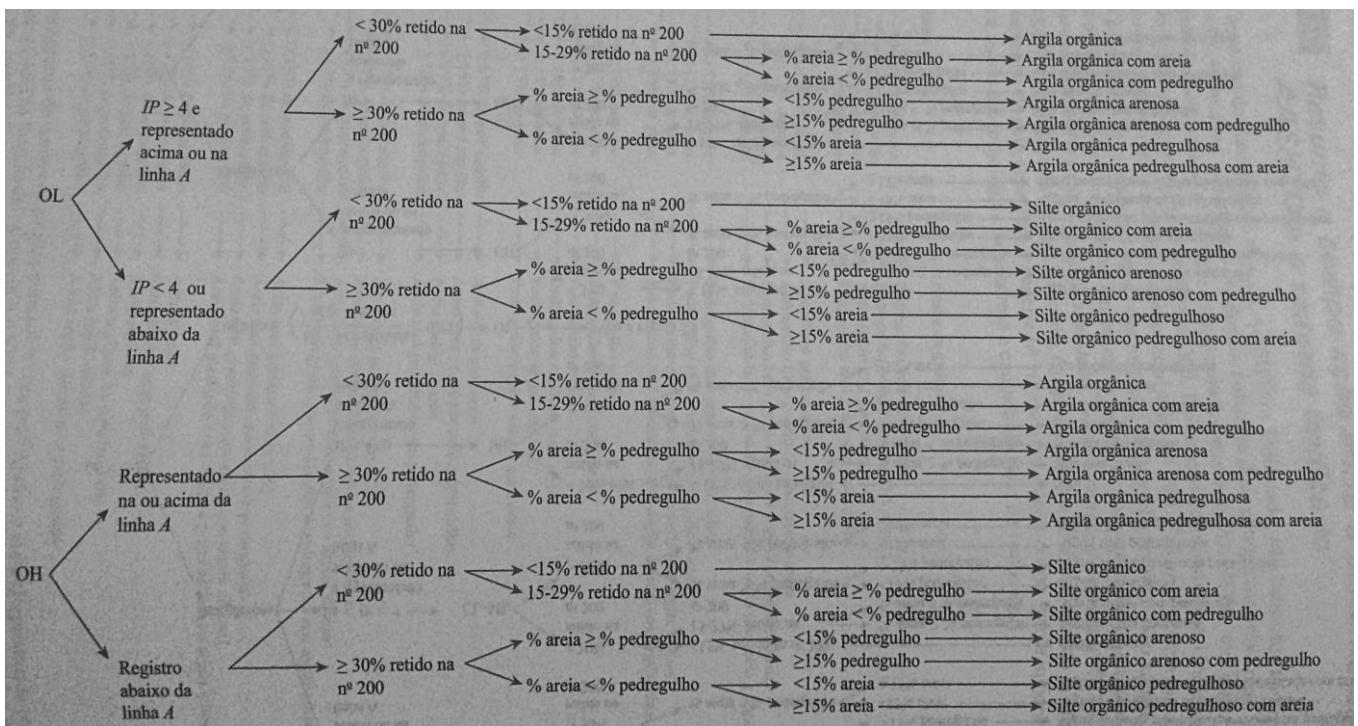


GW	< 15% de areia	Pedregulho bem graduado
	≥ 15% de areia	Pedregulho bem graduado com areia
GP	< 15% de areia	Pedregulho mal graduado
	≥ 15% de areia	Pedregulho mal graduado com areia
GW-GM	< 15% de areia	Areia bem graduada com silte
	≥ 15% de areia	Pedregulho bem graduado com silte e areia
GW-GC	< 15% de areia	Pedregulho bem graduado com argila (ou argila siltosa)
	≥ 15% de areia	Pedregulho bem graduado com argila e areia (ou areia e argila siltosa)



Fonte : BRAJA,2013

Figura 5 - Fluxograma de nomes dos grupos para solos orgânicos siltosos e argiloso.



Fonte : BRAJA.2013

#### 4. ÁREA DE ESTUDO

As amostras foram coletadas em um terreno particular, propriedade da empresa JHJ Construções e Empreendimentos, localizado na rua Coronel Pedro Targino, numero 968, na cidade de Araruna-PB.

Este local foi escolhido pela fácil extração da amostra indeformada, assim como, com o intuito de contribuir com pesquisas para a região.

#### 5. METODOLOGIA

Inicialmente, retiraram-se duas amostras indeformadas de solo, na profundidade da fundação da obra (2,5 metros) por meio de dois caixotes nas dimensões 50x50x25 centímetros cúbicos.

Após a coleta, determinaram-se os parâmetros para a caracterização do solo em estudo, mediante os ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade e o de peneiramento, de acordo com as normas NBR 6459/16; NBR 7180/88; NBR 7181/16, respectivamente, para classificar o solo de acordo com a tabela do Sistema unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

Realizada a classificação, foram moldados os corpos de prova com o solo natural, utilizando-se a energia do ensaio de Proctor normal, para assim verificar sua resistência à compressão simples. Posteriormente, o solo natural foi dosado com cal, conforme a Tabela 1, e moldado da mesma forma do solo natural; em seguida foram colocados dentro de sacos plásticos imersos em caixas com areia para não perder a umidade do solo durante os tempos de cura de 3 e 7 dias, para realizar o ensaio de compressão simples. Lembrando que todos os ensaios foram feitos em triplicata para uma maior confiabilidade dos resultados.

Figura 6 – retirada da amostra indeformada.



## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.1. PENEIRAMENTO

A amostra indeformada passou por uma série de peneiras, onde a abertura das peneiras foi diminuindo conforme a NBR 7181/88, a fim de determinar a porcentagem de solo seco passante em função da abertura das peneiras.

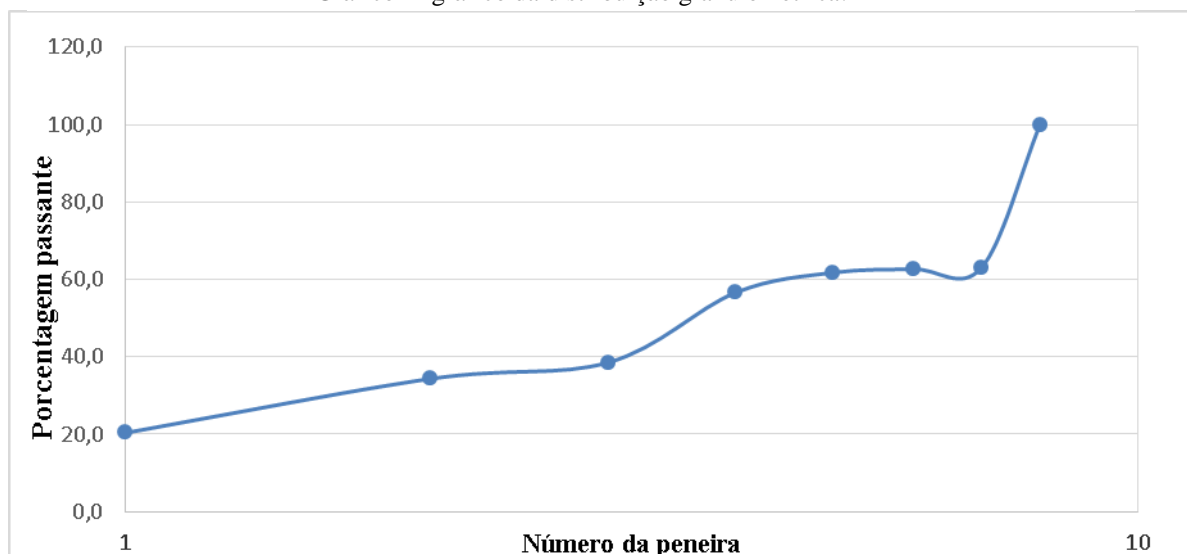
Os resultados estão mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Ensaio de granulometria.

N <sup>o</sup> da peneira	Abertura da peneira (mm)	Porcentagem passante
2	50,8	100
1	25,4	63
3/8"	9,51	62,7
4	4,76	61,8
10	2	56,6
40	0,42	38,6
80	0,177	34,3
200	0,074	20,4

A partir destas porcentagens retidas, foi possível traçar o gráfico do ensaio de granulometria, conforme mostrado no Gráfico 1.

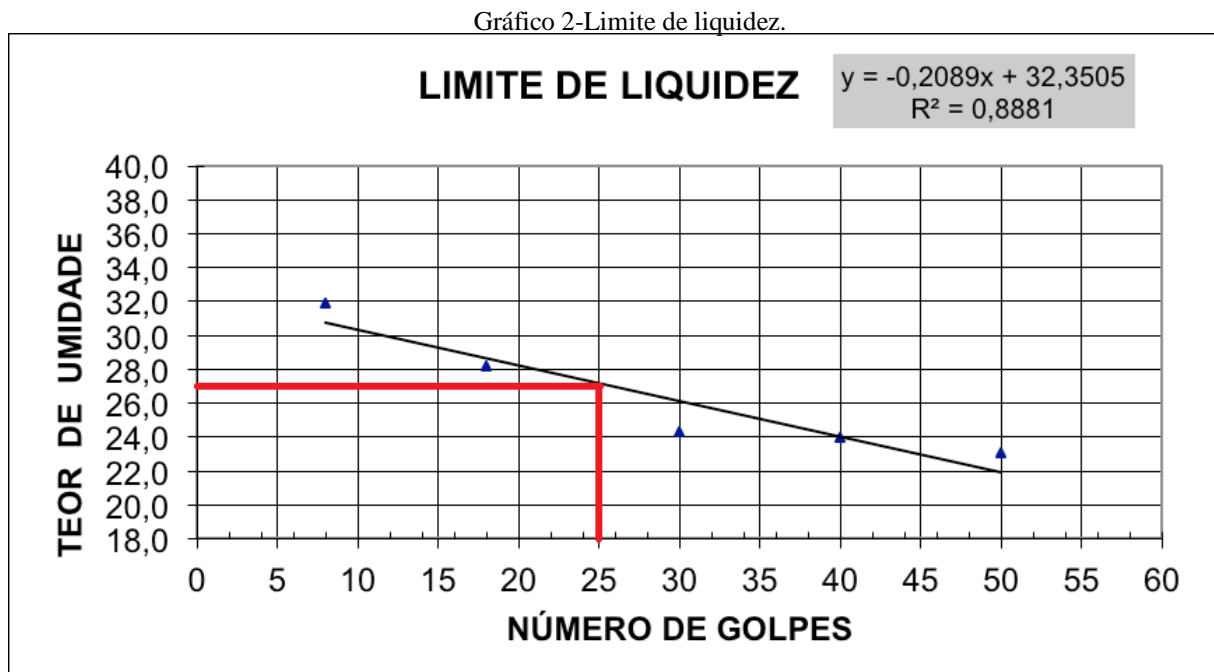
Gráfico 1- gráfico da distribuição granulométrica.



## 6.2. LIMITES DE ATTERBERG

Os limites de liquidez e plasticidade, também conhecidos como limites de Atterberg, consiste no limite em que o solo encontra-se entre o estado líquido e plástico, para o caso do limite de Liquidez, e entre o estado plástico e semissólido para o caso do limite de plasticidade.

Para o limite de liquidez foi esboçado um gráfico do numero de golpes em função do teor de umidade, para que fosse possível determinar o teor de umidade alcançada com 25 golpes, conforme a NBR 6459/2016.



Obtendo-se, por fim, os resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos limites de Atterberg.

L. Liquidez (%)	L. Plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
26,3	21,4	4,9

## 6.3. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

Mediante os ensaios acima foi possível classificar o solo conforme a tabela do SUCS, tendo em vista que, por meio do ensaio de granulometria se constatou que mais de 50% ficou

retido na peneira nº 200, enquadrando na categoria de solos grossos, assim como, mais de 50 % passa na peneira de nº 4, e como o índice de plasticidade ficou entre 4 e 7, o solo é classificado como SC-SM.

Com o auxílio da Figura 3 e sabendo-se que possuía mais de 15% de pedregulho, o solo é classificado como areia argilo-siltosa com pedregulho.

#### 6.4. DOSAGEM

Foi utilizado 4 % de teor de cal em relação à massa de solo. Assim, está no intervalo proposto pela Tabela 1 para solo do tipo argila siltosa. Logo, como cada corpo de prova possuía aproximadamente 2 quilogramas, o teor de cal para cada amostra foi de 0,08 quilogramas de cal hidratada.

Figura 7 – Dosagem de cal hidratada.



#### 6.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO NATURAL

A amostra de solo natural foi compactada com a energia do ensaio Proctor normal, onde, foram moldados três corpos de prova, a fim de realizar uma média dos valores de resistência à compressão simples.

Figura 8 – Amostra de solo natural.



As amostras do solo natural apresentaram os resultados mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados da resistência a compressão do solo natural.

Corpo de Prova 1	Corpo de Prova 2	Corpo de Prova 3
51 kPa	50 kPa	51 kPa

Mediante os resultados, foi obtido como media entre os três corpos de prova o valor de 51 kPa.

#### 6.6. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO-CAL

Para as amostras estabilizadas com cal, a dosagem foi realizada conforme mencionado anteriormente, sendo os corpos de prova rompidos nas idades de 3 dias e 7 dias. Este tempo foi estabelecido para que fosse possível a ocorrência das reações pozolânicas, garantindo a cimentação entre as partículas de solo.

Após a dosagem realizada os corpos de prova ficaram em um caixote dentro de sacos plásticos e o caixote recoberto com areia, sendo a areia umedecida durante sete dias com a finalidade de conservar a umidade presente no corpo de prova, ou seja, manter os 10% de umidade que foi adicionado durante a mistura de solo-cal.

Figura 9 - Caixote com as amostras de solo-cal.



A Tabela 6 apresenta os resultados da resistência à compressão simples para o solo estabilizado.

Tabela 6 – Resultado da tensão na amostra solo-cal conforme o tempo de cura.

Tempo de cura	Resistência a compressão simples (kPa)		
03 dias	53,50	53,50	53,50
07 dias	80,25	82,80	82,80

Tendo como base os resultados acima, obteve-se uma tensão média de 53,50 kPa para três dias de cura e de 81,95 kPa para sete dias de cura, com uma umidade de 10 %.

Observa-se, assim, um ganho na resistência à compressão simples de 57% do valor suportado pelo solo original. Ressalta-se que o processo de cura se estende até os 28 dias, aumentando, assim, ainda mais a resistência do sistema solo-cal.

## **7. CONCLUSÃO**

Por meio do estudo realizado foi possível observar a importância e eficiência da estabilização solo-cal para a melhoria de solos a serem utilizados na engenharia civil, com respeito ao aumento de sua resistência.

Mediante os resultados obtidos foi possível concluir que a resistência do solo estabilizado quimicamente com cal encontrou ganhos na resistência à compressão simples de forma significativa, apesar do pouco tempo de cura, pois segundo a literatura o tempo de cura ideal para medida de sua resistência é de 28 dias. A resistência à compressão simples teve um ganho de aproximadamente 57% do valor suportado pelo solo inicialmente, tornando o sistema solo-cal, um processo viável para este tipo de solo, por ser de baixo custo e boa eficiência.

## **8. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS**

Para um maior aprofundamento desta pesquisa seria importante avaliar o aumento da resistência com o aumento da idade de cura, bem como avaliar a resistência com outros teores de cal. Também, observar o efeito do adensamento em solos estabilizados com a cal, com a finalidade de diminuir os recalques sofridos pela fundação.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: **Análise granulométrica de solos**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: **Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: **Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

AZEVEDO, A.L.C. **Estabilização de solo com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. Dissertação de Mestrado. Universidade Geotécnica de Ouro Preto.

AZEVEDO PINTO, Nuno M.S. **Contribuição para o estudo da combinação de cal com cimento no tratamento de solos**. 2009. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

DAS, M. Braja. **Fundamentos da engenharia geotécnica**. Cengage Learning, 7. Ed. São Paulo, 2013.

BENETTI, Mozara. **Comportamento hidráulico e mecânico de um solo residual tratado com cal**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ED. Revisada e ampliada. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CARMO, Douglas C. **Fundação sobre solo melhorado com cimento: estudo de caso do bloco de sala de aula do curso de engenharia civil**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual da Paraíba.

COUTINHO, Joana de Sousa. **Cal aérea e cal hidráulica**. 2002. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.

CORTELETI, E. J. Baraldi. **Melhoramento de solo residual de Lajeado com a adição de cal**. 2013. Trabalho de conclusão de curso. Centro universitário Univates.

LOVATO, Rodrigo S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012

SANTOS, M.,LIMA, D., BUENO,B., **Estabilização dos solos com cal e betume.** Reunião de pavimentação urbana. Abril, 1995.

SOLIZ, Valeria V. Perreira. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica.** 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.