



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM SOLO EXPANSIVO DO MUNICÍPIO DE
PAULISTA-PE MELHORADO COM CIMENTO PORTLAND**

Raabi Inarair Ferreira Braz

Campina Grande – PB

2018

RAABI INARAIR FERREIRA BRAZ

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM SOLO EXPANSIVO DO MUNICÍPIO DE
PAULISTA-PE MELHORADO COM CIMENTO PORTLAND**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à coordenação do curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Campina Grande, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof. D.Sc. Carina Silvani

Coorientador: Eduardo Antônio Guimarães Tenório

Campina Grande – PB

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autora: Raabi Inarair Ferreira Braz

Título: AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM SOLO EXPANSIVO DO MUNICÍPIO DE PAULISTA-PE MELHORADO COM CIMENTO PORTLAND

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à coordenação do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 13/12/2018

Pela Banca Examinadora:

Orientadora: Prof. D.Sc. Carina Silvani

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Coorientador: Eduardo Antônio Guimarães Tenório

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Prof. Msc. Paulo Germano Tavares Marinho Filho

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Alexandre de Souza Júnior

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus por me permitir presenciar esse momento de finalização de curso, através de toda força emitida para que eu chegasse até aqui. Obrigada pela oportunidade de aprender com meus erros, pelo meu crescimento pessoal e profissional, por realizar mais um sonho e por Sua infinita misericórdia e amparo. À minha protetora, Virgem Maria que me conduziu desde o nascimento e me mostrou a luz diante de todas as adversidades ocorridas. A Nossa Senhora dos Impossíveis por tantas graças alcançadas e por me mostrar que tudo é possível através da fé.

Aos meus pais, Braz e Aparecida, por todo apoio desde sempre, o cuidado, proteção e amor incondicional, por acreditarem tanto no meu potencial e pelos ensinamentos de honestidade e integridade. Aos meus irmãos, Rodolfo e Rocyle, pela torcida por minhas conquistas e sonhos.

Ao meu noivo, Thales, obrigada por sempre estar ao meu lado, nos momentos bons e ruins e por me fortalecer na jornada de minha graduação.

A todos os meus familiares e amigos, pelas palavras otimistas e estímulos.

À minha orientadora Carina Silvani pela paciência, disponibilidade, atenção e compromisso com seus alunos, serei eternamente grata.

Ao Coorientador Eduardo Antônio por todos os ensinamentos, acompanhamento, paciência, disponibilidade e dedicação à pesquisa.

Aos meus colegas e amigos de engenharia civil, especialmente Paula, Flávio, Rayanne, Victor, Ricardo e Rayanne por todo companheirismo, ensinamentos, apoio e torcida. Serão inesquecíveis para mim.

A UFCG pela oportunidade de cursar Engenharia Civil e disponibilizar toda sua estrutura e docentes para minha formação.

RESUMO

O seguinte trabalho aborda o método de melhoramento de solos desenvolvido e colocado à disposição dos engenheiros civis. A técnica em questão refere-se ao melhoramento das características dos solos através da adição de produtos químicos, sendo o cimento um dos mais frequentemente utilizados. A utilização do cimento tem por objetivo aumentar a resistência mecânica do solo e permitir uma maior durabilidade. Isso é possível devido a sua ação aglutinante, que permite a cimentação entre as partículas de solo. As propriedades adquiridas pelos solos estabilizados com cimento são influenciadas por diversos fatores, como por exemplo: o tipo de solo, a quantidade de aditivo (teor de cimento), as condições de aplicação em obra, o teor de umidade e compactação, o tempo e temperatura de cura. Estes aspectos são citados e comentados ao longo da pesquisa. Assim, o objetivo principal desta pesquisa é a utilização do aditivo cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CP V ARI) a fim de tornar mais efetivo o desempenho de um solo expansivo proveniente do município de Paulista - PE a nível mecânico e a nível de durabilidade. O aditivo foi testado a três teores distintos (4, 6 e 8%) e a diferentes pesos específico aparente secos (14, 15 e 16 kN/m³). As etapas experimentais avaliaram a adequabilidade do solo e a mudança das suas características recorrendo a ensaios de análise granulométrica, compactação Proctor, limites de consistência e compressão simples. Foi possível concluir a caracterização do solo estudado, analisou-se que o solo trata-se de uma como argila inorgânica de mediana plasticidade (CL) com baixa compressibilidade. Foi apresentada a eficiência do aditivo escolhido através dos gráficos, onde foi mostrado que para maiores teores de cimento, a amostra apresenta maior resistência a compressão. Para maior compactação, também temos o aumento da resistência. Além disso, foi possível observar que a redução na porosidade da mistura compactada promove o aumento da resistência à compressão simples do solo-cimento estudado, independentemente da quantidade de cimento utilizado.

Palavras-chave: melhoramento de solo, cimento Portland, estabilização química, resistência à compressão simples, solo expansivo.

ABSTRACT

The following work approaches the method of soil improvement developed and made available to civil engineers. The technique in question refers to the improvement of soil characteristics through the addition of chemicals, with cement being one of the most frequently used. The use of the cement aims to increase the mechanical resistance of the soil and allow a greater durability. This is possible due to its agglutinating action, which allows cementation between soil particles. The properties acquired by cement stabilized soils are influenced by several factors, such as: soil type, amount of additive (cement content), conditions of application on site, moisture content and compaction, time and curing temperature. These aspects are mentioned and commented throughout the research. Thus, the main objective of this research is the use of the additive Portland cement type V of high initial resistance (CP V ARI) in order to make the performance of an expansive soil from the municipality of Paulista - PE more effective at mechanical and durability level. The additive was tested at three different contents (4, 6 and 8%) and at different dry unit weight (14, 15 and 16 kN / m³). The experimental stages evaluated the soil suitability and the change of its characteristics using granulometric analysis, Proctor compaction, consistency limits and simple compression. It was possible to conclude the characterization of the studied soil, it was analyzed that the soil is an inorganic clay of medium plasticity (CL) with low compressibility. The efficiency of the additive chosen was presented through the graphics, where it was shown that, for higher cement contents, the sample presents greater resistance to compression. For increased compaction, an increased on resistance is also observed. In addition, it was possible to observe that the reduction in the porosity of the compacted mixture promotes the increase of the resistance to simple compression of the soil-cement studied, independently of the amount of cement used.

Key-words: soil improvement, Portland cement, chemical stabilization, simple compressive strength, expansive soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ocorrências prováveis de solos expansivos no Brasil	16
Figura 2: Esquema de solo com: a) alto teor em cimento; b) baixo teor em cimento	19
Figura 3: Efeito da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cimento Portland e curados por 7 dias.....	21
Figura 4: Efeito do tempo de cura para os solos estabilizados com 5% de cimento	22
Figura 5: Relação UCS com porosidade por teor volumétrico de cimento	23
Figura 6: Fluxograma da pesquisa.....	26
Figura 7: Fluxograma do programa experimental da pesquisa.....	27
Figura 8: Solo utilizado na pesquisa.....	28
Figura 9: Escolha do teor mínimo de cal – ICL	30
Figura 10: Escolha dos pontos de umidade e peso específico seco para a pesquisa	30
Figura 11: Moldagem do corpo de prova – Compactação.....	34
Figura 12: Corpo de prova após a compactação, antes de desmolde	35
Figura 13: Corpo de prova desmoldado, etapa de medição e pesagem.....	35
Figura 14: Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão simples	36
Figura 15: Curva granulométrica do solo – sem defloculante.....	38
Figura 16: Curva granulométrica do solo – com defloculante	39
Figura 17: Curva de compactação do solo.....	41
Figura 18: Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cimento das amostras.....	44
Figura 19: Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade dos corpos de prova curados	44
Figura 20: Relação entre porosidade/teor volumétrico de cimento e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados (curvas para cada teor)	46
Figura 21: Relação entre porosidade/teor volumétrico de cimento e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados (curva unificada)	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros da equação de previsão da resistência à compressão simples para diferentes tipos de solo.....	24
Tabela 2: Composição e informação sobre ingredientes	29
Tabela 3: Variáveis Investigadas no Programa Experimental	31
Tabela 4: Variáveis Fixadas no Programa Experimental.....	31
Tabela 5: Variáveis de Ruído no Programa Experimental.....	31
Tabela 7: Composição do solo (sem defloculante)	38
Tabela 8: Composição do solo (com defloculante).....	39
Tabela 9: Limites de Atterberg e massa específica real do solo	40
Tabela 10: Dados gerais dos corpos de prova.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo Geral.....	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1	Tipos de solos sujeitos ao fenômeno de expansão e locais de sua ocorrência.....	14
3.2	Métodos geotécnicos de reforço e estabilização	17
3.2.1	Estabilização química	17
3.2.2	Estabilização solo-cimento	18
3.2.3	Fatores que influenciam a estabilização solo-cimento	20
3.3	Dosagem	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1	Solo	28
4.2	Cimento.....	28
4.3	Definição das Variáveis	29
4.3.1	Variáveis Investigadas	29
4.3.2	Variáveis Fixadas	31
4.3.3	Variáveis de ruído.....	31
4.3.4	Variáveis de resposta	32
4.4	Métodos	32
4.4.1	Ensaio de caracterização do solo	32
4.4.2	Preparação das amostras de solo para ensaios de compactação e caracterização 32	
4.4.3	Distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos	33
4.4.4	Ensaio de limite de liquidez (LL)	33
4.4.5	Ensaio de limite de plasticidade (LP)	33

4.4.6	Ensaio de Compactação Proctor	33
4.4.7	Ensaio envolvendo a mistura de solo-cimento.....	34
4.4.8	Preparação das Misturas, Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova para Ensaio de Compressão Simples	34
4.4.9	Ensaio de resistência à compressão simples.....	36
5	RESULTADOS.....	37
5.2	Ensaio de Caracterização Física.....	37
5.2.1	Distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos	37
5.2.2	Determinação do peso específico dos grãos do solo	40
5.2.3	Curva de compactação.....	41
5.3	Ensaio Mecânico.....	41
5.3.1	Ensaio de compressão simples.....	42
6	CONCLUSÕES.....	47
7	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

O material mais utilizado na Engenharia Geotécnica é o solo e este apresenta características muito complexas e variáveis (DALLA ROSA, 2009). Com a grande expansão na última década da construção civil, cada vez mais os empreendimentos estão sendo alocados em áreas que possuem solos com baixa capacidade de suporte. Algumas soluções vêm sendo adotadas para minimizar esses problemas, entre elas, está a realização de fundações profundas, ou a substituição do material de baixa qualidade por um de boa qualidade. A primeira solução apresenta um alto custo, já a segunda, depende de jazidas e bota-foras próximos ao local da obra, o que pode representar, além de um alto custo, um grande problema ambiental. Uma terceira solução é o melhoramento deste solo através da compactação do material e a estabilização física e química com a adição de materiais estabilizantes, sendo eles, ativadores, como cal ou cimento.

A estabilização de um solo é considerada a modificação de suas características a fim de se obter propriedades de longa duração. Caracteriza-se pelo aumento de sua resistência à deformação e ao deslocamento quando sujeitos a carregamentos. Consiste no tratamento do solo, por um processo mecânico, ou químico, tornando-o estável para os limites de sua utilização, e permanecendo assim, sob a ação de cargas exteriores e ações climáticas (BATISTA, 1976).

A escolha do tipo de estabilização a ser realizado deve ter viabilidade técnica e econômica. Para tanto, é necessário conhecer os métodos de estabilização de solos, dos mais tradicionais até as novas técnicas disponíveis no mercado. Entre os principais métodos de estabilização de solos temos a compactação, a correção granulométrica e a adição de estabilizantes químicos; estes podem ser usados individualmente ou em conjunto.

Nesse contexto, este trabalho visa o tratamento de um solo expansivo encontrado próximo à cidade de Paulista, na região litorânea do nordeste do Brasil. Um solo potencialmente expansível é aquele que apresenta expansão ou contração quando sofre variação na umidade ou na sucção. Normalmente, a fração argila destes solos, é constituída de materiais expansivos (Justino da Silva, 2001).

A variação de umidade em um solo potencialmente expansivo provoca uma instabilidade volumétrica, que é transferida às obras através de suas fundações, como levantamento nos períodos mais úmidos e recalques devido à contração dos solos nos períodos secos.

Solos potencialmente expansivos têm sido identificados em todos os continentes. A maior ocorrência tem sido verificada nas regiões áridas e semi-áridas, em locais onde a evaporação anual excede a precipitação pluviométrica, acarretando uma acentuada variação de umidade.

No Nordeste do Brasil existem extensas áreas, distribuídas nos estados do Pernambuco, Rio Grande do Norte, Alagoas e Bahia, onde foi constatada a ocorrência de solos potencialmente expansivos. No litoral Norte de Pernambuco, encontram-se grandes áreas que apresentam argilas potencialmente expansivas (SCHREINER, 1987).

Diversas vezes este tipo de solo, além da tendência de variação volumétrica, apresenta baixa resistência sendo necessário um processo de estabilização para poderem ser utilizados em obras rodoviárias ou para permitir o uso em fundações.

Logo o presente trabalho concentra-se na análise do desempenho do solo expansivo com a adição do Cimento Portland de alta resistência inicial CP V - ARI. A mistura solo-cimento é originada a partir da compactação e cura da mistura envolvendo o solo, cimento e água, com a intenção de satisfazer os critérios de estabilidade e durabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é investigar o efeito da interação do Cimento Portland V - ARI com o solo expansivo do município de Paulista – PE.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos para esta proposta de pesquisa são:

- Caracterização geotécnica de solo expansivo do município de Paulista – PE;
- Investigar a eficiência da estabilização com cimento em um solo expansivo;
- Avaliar a influência do peso específico seco na estabilização de um solo expansivo;
- Avaliar a aplicabilidade do coeficiente porosidade/teor volumétrico de cimento na previsão da resistência a compressão simples.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A expansividade de um solo possui diversas definições e terminologias na bibliografia. (SCHREINER, 1987 apud FERREIRA, 1995) diferenciou os termos como "expansividade intrínseca", "expansão" e "inchamento". A expansividade intrínseca é considerada como capacidade de um argilo-mineral de absorver água. É uma propriedade intrínseca da argila que não é alterada pela umidade ou sucção existente. É definida como sendo uma propriedade resultante de sua composição mineralógica e quantidade de argila, que interagem com a água. Não há metodologia de ensaio desenvolvida para medir esta propriedade, devendo-se isto, possivelmente, ao fato da geotecnia não fazer distinção adequada entre expansividade intrínseca, expansão e inchamento.

A expansão de um solo expansivo intrinsecamente pode ser definida como a mudança de volume resultante da mudança de umidade ou sucção. Ela pode também ocorrer em todos os solos devido à redução de tensão efetiva ou, em alguns solos, devido às mudanças químicas. E o inchamento é definido como o deslocamento vertical de um ponto do solo ou de uma fundação, resultante de um solo expansivo intrinsecamente. É um parâmetro usualmente medido em campo. O potencial de inchamento de solos é também considerado a principal causa de dano à construção civil: rachaduras em calçadas e pisos; danos às estruturas de ruas e estradas, condenação de edifícios e rompimento de oleodutos e linhas de esgoto (SCHREINER, 1987 apud FERREIRA, 1995).

Para que um solo possa exibir expansividade, são necessários dois requisitos fundamentais:

- Devem existir, e entrar em funcionamento, certos mecanismos que, a nível microescalar produzam a instabilidade volumétrica do solo;
- Devem estar presentes, forças capazes de transferir a umidade de um ponto a outro do solo. Isso implica um desequilíbrio da umidade natural do contorno.

Para que se manifeste o potencial expansivo na mudança de umidade do solo, destacam-se dois grandes grupos:

- Mudanças sazonais;
- Modificações da umidade natural do terreno pela ação humana.

As mudanças sazonais estão vinculadas às variações climáticas ao longo do ano. As oscilações periódicas de umidade na superfície do terreno dependem da relação precipitação/evaporação (FERREIRA,1995).

3.1 Tipos de solos sujeitos ao fenômeno de expansão e locais de sua ocorrência

A ocorrência de problemas de engenharia associados aos solos expansivos são registrados em diversos continentes e países. Na África (Angola, Etiópia, Gana, Kênia, Nigéria, África do Sul, Tanzânia e Zíbia), Américas (Canadá, Argentina, Peru, Venezuela, Estados Unidos), Austrália (Ilhas Rainhas, Austrália do Sul e Victoria), "Eurásia" (China, Índia, Romênia, Espanha, Reino Unido) e Oriente Médio (Israel, Jordânia e Arábia Saudita), (SCHREINER, 1987).

Vários são os tipos de solo sujeitos ao fenômeno de expansão, entre eles podem se destacar (FERREIRA, 1995):

- Solos oriundos de rochas ígneas, basicamente, basalto, diabases e gabros, onde os feldspatos e piroxênios se decompõem para formar montmorilonita e minerais secundários;
- Solos oriundos de rochas sedimentares com constituinte argilo mineral montmorilonita. Exemplos: folhelhos, margas, calcários, que se desagregam facilmente.

No Brasil, os solos expansivos são encontrados em várias regiões do país. No Nordeste, Vargas (1989) mostra manchas de vertissolos que aparecem, em camadas de formação cretácea, aproximadamente ao longo do meridiano da Bahia para o norte, até atravessar Pernambuco e Ceará. Costa Nunes et al (1982) destacaram solos expansivos na área do grande Recife, da Formação Maria Farinha do Grupo Barreiras e de rochas extrusivas básicas. Ferreira (1988) estudou solos expansivos em vários municípios de Pernambuco. Gusmão Filho e Silva (1991) e posteriormente Jucá et al (1992) estudaram através de ensaios de laboratório e instrumentação de campo o comportamento de uma argila expansiva da área metropolitana do Recife. O solo expansivo do Massapê do Recôncavo Baiano foi motivo de estudos de vários pesquisadores: Sobral (1956), Simões e Costa Filho (1981), Presa (1986).

Nas regiões Centro-Sul e Sul, já foram encontrados solos expansivos em camadas superficiais de podzólicos das Formações Passa Dois e Grupo Tubarão, nos estados de São

Paulo, Paraná e Santa Catarina e, também, na Formação Santa Maria, no Rio Grande do Sul. A Figura 1 mostra no mapa do Brasil, áreas de ocorrência de solos potencialmente expansivos.

Figura 1: Ocorrências prováveis de solos expansivos no Brasil



1	Paulo Dutra / MA	FERREIRA (1988)	---
2	Poreilhas / RN	LINS et al (1986)	Formação Seridó
3	Carnaíba / PE	FERREIRA (1988)	Complexo Monteiro / Bruno Não Cálculo
4	Afrânio	FERREIRA (1989)	Grupo Salgueiro / Cachoeirinha / Areia Quartzosa / Bruno Não Cálculo
5	Petrolina / PE	FERREIRA (1989)	Grupo Salgueiro / Areia Quartzosa / Bruno Não Cálculo
6	Cotrobé / PE	FERREIRA (1989)	Complexo Presidente Juscelino / Cálculo Bruno Não
7	Salgueiro / PE	FERREIRA (1989)	Bruno Não Cálculo
8	Serra Talhada / PE	FERREIRA (1989)	Complexo Monteiro / Bruno Não Cálculo
9	Petrolândia / PE	FERREIRA (1989)	Areia Quartzosa
10	Ibimirim / PE	FERREIRA (1989)	Bruno Não Cálculo
11	Paulista / PE	FERREIRA (1989)	Formação Maria Farinha
12	Olinda / PE	COSTA NUNES et al (1982)	Formação Maria Farinha / Siltitos
13	Olinda / PE	JUCA et al (1992)	Formação Maria Farinha
14	Cabo / PE	COSTA NUNES et al (1982)	Rochas Extrusivas Básicas
15	Reservatório de Ilaporica / PE-BA	SIGNER et al (1989) VARGAS et al (1989)	Siltitos e Argilitos
16	Reservatório de Ilaporica / PE-BA	SANTOS e MARINHO (1990)	Sedimentos da Bacia do Jatobá da Formação Aliança
17	Maceió / AL	FERREIRA (1989)	Bruno Não Cálculo
18	Juazeiro / BA	FERREIRA (1988)	Grupo Salgueiro
19	Recôncavo baiano / BA	SIMÕES e COSTA FILHO (1981)	Grupos Ilhas e Santo Amaro e Formação São Sebastião / Vertissolo
20	Baio de Aratu / BA	BARRETO et al (1982)	Vertissolo
21	Salvador - Feira de Santana / BA	PREÇA (1986)	Solos Residuais / Vertissolo
22	Recôncavo baiano / BA	SIMÕES (1986)	Grupo Santo Amaro
23	Recôncavo baiano / BA	SIMÕES (1986)	Grupo Ilhas
24	Recôncavo baiano / BA	SIMÕES (1986)	Formação São Sebastião
25	Campinas / SP	SAMARA (1981)	Podzólico
26	Sudeste de SP e do PR	VARGAS et al (1989)	Formação Tubarão
27	Porto Alegre / RS	VARGAS et al (1989)	Formação Rosário do Sul

Fonte: VARGAS (1990) com ampliação de FERREIRA (1990)

3.2 Métodos geotécnicos de reforço e estabilização

Os solos com alta deformabilidade e baixa capacidade de suporte de carga tornam áreas impróprias para construção ou necessitam de alteração de projeto como solução, sendo essas alternativas muitas vezes inviáveis financeiramente. As técnicas de melhoramento de solo apresentam-se como solução econômica e ecologicamente mais adequada para este tipo de problema, pois localizam o solo local como matéria-prima.

De acordo com Racana et al. (2001) melhorar um solo é um princípio composto pela inclusão de diferentes materiais a uma massa compactada de solo, sendo estes materiais capazes de resistir a tensões de tração. Para uma boa transmissão de esforços, e conseqüentemente, a garantia da segurança de uma estrutura de solo reforçado, a interação entre o solo e o reforço é essencial.

Segundo Casagrande (2001), na atualidade as técnicas de melhoria ou reforços de solos são bem difundidos, com a utilização de processos físicos e/ou químicos que visam o aumento da resistência e a diminuição da compressibilidade e permeabilidade dos maciços.

O melhoramento geotécnico baseia-se nos métodos de trocar, comprimir, grampear ou grautear o solo, podendo ser empregado em projetos de vias de comunicação viárias ou ferroviárias, aeroportos, obras de terra e projetos de fundações. As técnicas combinam a compactação com processos químicos ou inclusão de materiais de reforço.

3.2.1 Estabilização química

A técnica é utilizada por existir a escassez de áreas com solos com características apropriadas para realização de obras geotécnicas. A substituição desses materiais ou a estabilização do solo são soluções para essa escassez.

A opção de substituir o solo apresenta grandes impactos ambientais que podem levar a inviabilidade da construção. Já a estabilização mostra maiores vantagens como maior economia, ganhos de resistência ao material, redução da necessidade de extração de solo de jazidas de outras regiões e menor tempo de execução da obra. Porém deve-se avaliar qual combinação irá propiciar melhorias nas propriedades de cada tipo de solo.

Vale ressaltar que a técnica de melhoramento de solo consiste na utilização de processos químicos e físicos que visam aprimorar as propriedades mecânicas por meio do aumento de resistência, diminuição da compressibilidade e da permeabilidade dos solos,

enquanto que o procedimento de reforço está associado à utilização de inclusões ao maciço (CASAGRANDE, 2001).

Segundo Casagrande (2001) a técnica de melhoramento por processos químicos combina a compactação do solo com a adição de um novo material que pode ser, cal, cimento e materiais betuminosos, alcançando assim o objetivo desejado, ou seja, a estabilização.

Os estabilizantes químicos provocam reações como troca catiônica com partículas de argilas, reações cimentícias e pozolânicas. O uso da cal e do cimento torna o solo estável para os limites de sua utilização, ocorrendo uma alcalinidade elevada que procede numa alta resistência.

Oliveira (2010) ressalta a importância da ação de agentes químicos para melhorar as propriedades mecânicas de um solo que não apresente características geotécnicas exigidas para suportar a obra projetada. Neste sentido a estabilização química é fundamental para conferir coesão, derivada da cimentação ou aglutinação das partículas do solo.

A escolha do componente químico utilizado para promover a estabilização deve ser definida a partir da economia, tempo de execução, finalidade da obra e de forma particular das propriedades dos materiais a serem corrigidos.

3.2.2 Estabilização solo-cimento

O termo solo-cimento define uma mistura de solo com quantidades apropriadas de cimento e água, combinação essa previamente determinada por processo próprio de dosagem em laboratório. A mistura de solo-cimento apresenta como propósito a melhoria de propriedades como resistência e deformabilidade do solo, tal técnica tem sido empregada com sucesso em bases para pavimentos, barragens de terra e proteção de encostas (DIAS, 2012).

Segundo Sandroni e Consoli (2010) quase todos os tipos de solos podem ser estabilizados, podendo para tanto ser utilizados diversos tipos de cimentos. A técnica torna-se difícil quando o solo se classifica como argila muito plástica e com percentuais maiores que 2% de matéria orgânica, o que demandaria altos teores de cimento na mistura.

A adição de cimento nas misturas cresce com o aumento do percentual de finos presentes no solo. Por isso, as amostras de solo-cimento devem ser primeiramente submetidas a ensaios de compactação, utilizando-se a energia adequada para se obter maior grau de compactidade. Além disso, o material deve passar por um período de cura para promover o

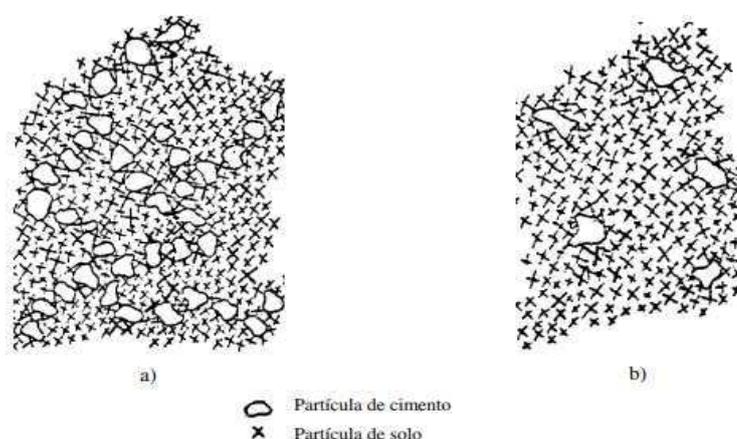
endurecimento da mistura e ser submetida posteriormente ao ensaio de compressão simples, de forma a avaliar os avanços de resistência mecânica e durabilidade.

Em estudos realizados sobre a microestrutura das areias cimentadas Chang e Woods (1992) perceberam que para baixos níveis de cimentação, o cimento tende inicialmente a se agrupar com as partículas de solo de forma a recobri-las. Sendo maiores os contatos dos grãos de cimento e solo para níveis de cimentação mais elevados, uma vez que o cimento preenche os espaços vazios do solo.

Um dos mecanismos permite o aumento da resistência mecânica devido à ação aglutinante do aditivo, que cimenta as partículas de solo. Este efeito verifica-se quando os teores em cimento são mais elevados, em que o cimento forma núcleos interligados distribuídos pela massa de solo (Figura 2 a).

Para teores em cimento mais baixos, verifica-se fundamentalmente uma modificação da fração argilosa do solo, que diminui a sua plasticidade, podendo ser ou não acompanhada de aumento da resistência mecânica, uma vez que o cimento, nestes casos, forma núcleos independentes na massa de solo (Figura 2 b).

Figura 2: Esquema de solo com: a) alto teor em cimento; b) baixo teor em cimento



Fonte: CATTON (1962) apud ALMEIDA (2016)

Rodrigues (1992) descreve que a ação do cimento adicionado aos solos granulares proporciona aspectos semelhantes aos que se sucedem no concreto, no que se refere ao desenvolvimento de vínculos de coesão das partículas dos grãos. Entretanto, devido a menor densidade e ao não preenchimento de todos os vazios nos agregados, a resistência mecânica alcançada no concreto acaba sendo maior.

Nos solos finos, a presença de frações coloidais de pequenas dimensões não comporta a difusão dos íons, dificultando a hidratação do cimento e impedindo o crescimento dos cristais, uma vez que, parte do ligante não colaborará para a estabilização da microestrutura. Tal fato pode inviabilizar de maneira técnica e econômica a estabilização química do solo fino com a adição do cimento (ALMEIDA, 2016).

Em pesquisa realizada por Foppa (2005) foram realizados ensaios de resistência à compressão simples em solo residual de arenito Botucatu classificado como areia fina, ao qual foram adicionadas percentagens de cimento de alta resistência inicial de 1% a 7%, calculadas em relação à massa de solo seca. A adição do agente químico promoveu ganhos significativos de resistência ao material.

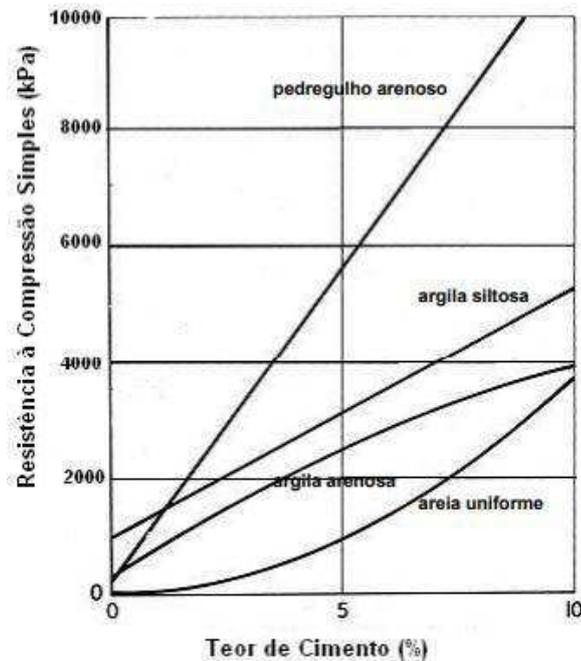
Cruz (2004) realizou uma pesquisa acerca das modificações dos índices físicos e das propriedades mecânicas do solo quando inserido baixo teor de cimento, não ultrapassando o valor de 10% da massa do solo seco. Os resultados obtidos demonstraram que os primeiros sete dias de cura são fundamentais para o ganho de resistência das misturas, ressaltando que a maior parte das reações de hidratação ocorrem durante esse período.

3.2.3 Fatores que influenciam a estabilização solo-cimento

Segundo Almeida (2016) a qualidade final da mistura de solo e cimento pode ser influenciada por alguns fatores interferindo diretamente na sua resistência. Tais fatores são descritos abaixo:

- **Granulometria:** para estabilização química de um solo devem-se considerar as decorrências econômicas e de trabalhabilidade. Neste sentido por apresentarem maior área de contato entre as partículas e conseqüentemente uma cimentação mais elevada, os solos classificados como granulometria grossa e bem graduado são mais indicados para a estabilização com cimento. Enquanto que solos de granulometria fina, como as argilas necessitam de um teor mais elevado de cimento para estabilização. Fato que pode ser observado na Figura 3.

Figura 3: Efeito da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cimento Portland e curados por 7 dias

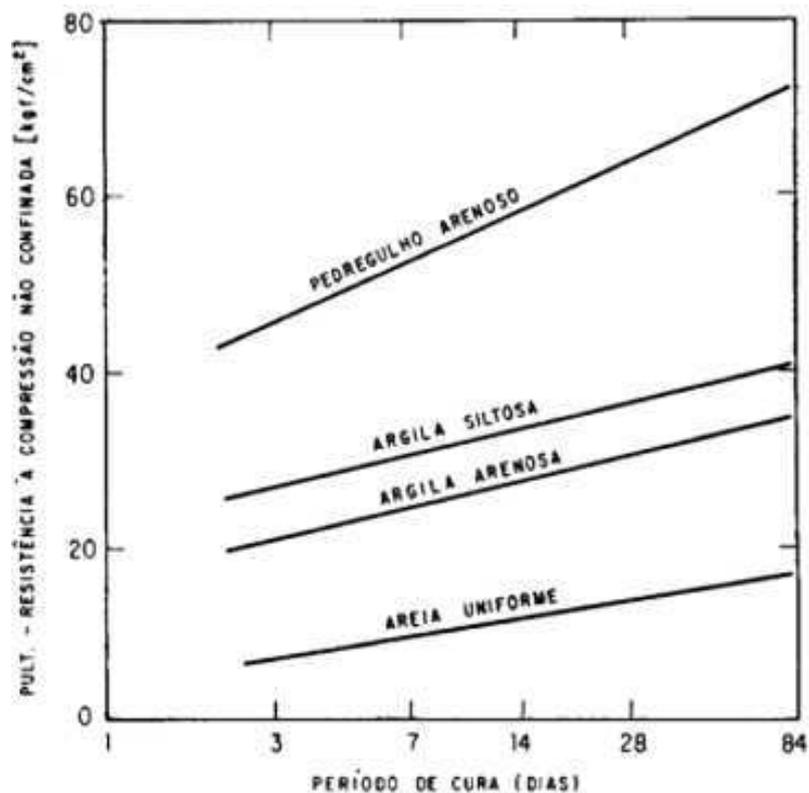


Fonte: INGLES & METCALF (1972)

- Teor de cimento: o cimento deve ser adicionado em quantidades determinadas no intuito de apresentar melhorias nas propriedades do solo, tais como aumento da coesão, diminuição na expansão ou compressibilidade e aumento na resistência.
- Teor de umidade e compactação: o processo cimentante adequado é obtido quando a mistura de solo-cimento-água encontra-se altamente compactada com um teor de umidade capaz de promover uma máxima densificação e a hidratação do cimento. A quantidade de água na mistura influenciada pelo tipo de solo, uma vez que o processo de hidratação ocorre imediatamente após o cimento entrar em contato com a água. Portanto é importante compactar a mistura o mais rápido possível para se evitar o endurecimento da massa de solo estabilizado e como consequência um maior esforço para se realizar a compactação.
- Tempo e temperatura de cura: a cura do material é de extrema importância para se garantir a qualidade prevista na dosagem, uma vez que a resistência aumenta gradualmente com o tempo de 28 dias de cura, sendo os acréscimos pouco significativos após essa idade, tal fato pode ser observado na Figura 4 que apresenta ganhos de resistência com o tempo de cura para quatro tipos de solos. Vale ressaltar que para temperaturas mais elevadas são obtidos maiores ganhos de resistência.

A homogeneização da mistura é importante na qualidade final da estabilização, entretanto, o prolongado tempo dessa homogeneização promove o aparecimento das primeiras redes cristalinas por cimentação que serão destruídas ocasionando assim a redução da resistência. Para tanto, recomenda-se um tempo máximo de duas horas, para temperaturas em torno de 25°C, entre o início da preparação da mistura e a sua compactação.

Figura 4: Efeito do tempo de cura para os solos estabilizados com 5% de cimento



Fonte: METCALF (1969) apud ALMEIDA (2016)

3.3 Dosagem

A utilização da técnica para dosagem de misturas de solo-cimento depende de alguns testes de laboratório, que possuem a finalidade de quantificar o mínimo de cimento que é necessário e que deve ser adicionado ao solo para fornecer as características previstas e adequadas para a aplicação.

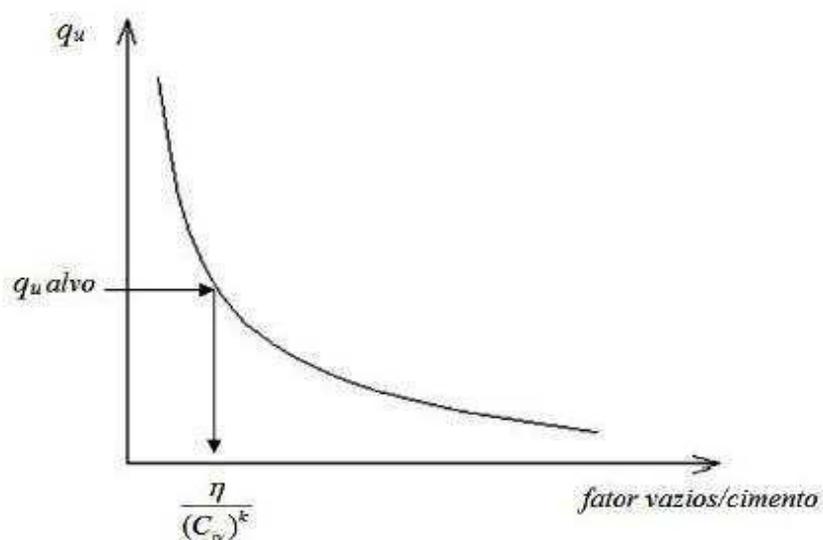
O processo de dosagem no Brasil é regido pela NBR 12253 (ABNT, 2012). A partir desta norma, passou a ser possível a estimativa dos teores de cimento a serem utilizados na estabilização de solos. O procedimento descrito pela norma envolve a classificação granulométrica do solo, a obtenção de padrões de compactação da mistura e confecção de

corpos de prova com pelo menos três valores distintos de cimento, com a finalidade de mensurar a quantidade que atende à resistência à compressão simples mínima de 2,1 MPa após 7 dias de cura.

Foppa (2005) realizou um estudo sobre as variáveis que mais influenciam na resistência mecânica de solos artificialmente cimentados, apresentando um método de dosagem racional similar ao existente para o concreto, onde a variável $\frac{\eta}{(C_{iv})^k}$ denominada *fator vazios/cimento* (η : porosidade da mistura compactada; $(C_{iv})^k$: teor de cimento volumétrico ajustado por um expoente), possui papel fundamental assim como o fator água/cimento para o concreto.

O método consiste na obtenção de uma curva fator vazios/cimento *versus* resistência à compressão simples, também chamada de "curva de dosagem". Após estabelecer a curva de dosagem, verifica-se por meio do gráfico qual o fator vazios/cimento que corresponde à resistência à compressão simples (UCS) desejada. Assim é possível escolher a densidade na qual a mistura deve ser compactada e a quantidade de cimento necessário, como ilustra a Figura 5.

Figura 5: Relação UCS com porosidade por teor volumétrico de cimento



Fonte: FOPPA (2005)

Após alguns estudos e ensaios, com diversos tipos de solos, abrangendo desde solos argilosos até predominantemente pedregulhosos, obteve-se as equações, Equação 1, como regra geral:

$$q_u = \frac{A}{P^B} \quad \text{Equação 1}$$

$$P = \frac{\eta}{(C_{iv})^k} \quad \text{Equação 2}$$

Onde A , B e k , são constantes de ajuste da equação de resistência. É possível verificar o valor das constantes A , B e k obtidas para cada material, considerando o máximo coeficiente de correlação R^2 , de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros da equação de previsão da resistência à compressão simples para diferentes tipos de solo

FONTE	TIPO DE SOLO	TEORES DE CIMENTO EM RELAÇÃO A MASSA DE SOLO SECA (%)	η (%)	γ_d (kN/m ³)	PARÂMETROS DA EQUAÇÃO PARA PREVISÃO DE q_u (Kpa)		
					A	B	k
FLOSS (2012)	Pedregulho Arenoso	1 ; 2 ; 3 ; 5 ; 7 ; 9	26,7; 29,1; 32,3	17,1; 17,9; 18,6	1,25E+05	2,10	0,85
FLOSS (2012)	Areia Pedregulhosa	2 ; 3 ; 5 ; 7	36,5; 38,3; 40,8; 45,1	14,7; 15,8; 16,5; 17,0	8,78E+04	1,50	0,85
FLOSS (2012)	Areia Fina de Origem Basáltica	1 ; 2 ; 3 ; 5 ; 7 ; 9	44,7; 48,1; 50,8	13,0; 13,7; 14,6	3,92E+09	4,26	0,23
FLOSS (2012)	Areia Fina a Média de Origem Micácea	2 ; 3 ; 5 ; 7	57,0; 60,5; 63,2	13,2; 15,3 ; 17,2	3,09E+16	7,98	0,10
CRUZ (2008)	Areia Fina	1 ; 3 ; 5 ; 7 ; 9; 12	40,5; 41,8; 43,7	16,0; 15,5; 15,0	3,11E+04	1,36	1,00
SEVERO (2008)	Areia Argilosa	2 ; 5 ; 10	32,8;35,4 ; 39,0 26,4; 28,8; 31,7;	17,2; 18,0; 18,8 17,3; 18,0; 19,0; 19,7	5,95E+05	2,21	0,55
FOPPA (2005)	Areia Fina Siltosa	1; 2; 3; 5; 7; 9; 12	34,4; 31,7	17,3; 18,0; 19,0; 19,7	5,03E+07	3,32	0,28
ROSA (2010)	Silte Argiloso	3 ; 5 ; 7 ; 9	40,4; 44,1; 40,4	14,0; 14,9; 15,9	1,54E+09	3,90	0,35
ROJAS (2012)	Argila Silto-Arenosa	5 ; 10 ; 15 ; 20	44,9; 48,3; 51,9	13,8; 14,8; 15,7	8,16E+07	3,09	0,30
MARQUES (2012)	Argila Silto-Arenosa	3 ; 5 ; 7 ; 9	40, ;43,3 ; 47,8	13,8; 15,1; 15,9	6,74E+08	4,16	0,50

Fonte: Foppa (2005)

O parâmetro $\frac{\eta}{(C_{iv})^k}$ permite conciliar o efeito da porosidade e do teor de cimento sobre resistência à compressão simples, compensando os parâmetros η ou C_{iv} , mantendo constante o valor de q_u .

Já o significado do expoente k , aplicado ao teor de cimento volumétrico, pode ser resumido. Para $k = 1$, significa que, dado um aumento na porosidade ou teor volumétrico de cimento, uma alteração proporcional no outro parâmetro é suficiente para a obtenção da mesma resistência à compressão simples; para $k > 1$, a influência do teor volumétrico de cimento

sobrepõe à influência da porosidade; para $k < 1$, a influência da porosidade sobrepõe à influência do teor volumétrico de cimento.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico são apresentados os materiais e métodos utilizados na pesquisa, além das especificações para a obtenção das propriedades físicas do solo analisado. Serão descritos também os procedimentos empregados para estudar o comportamento mecânico do solo, e deste estabilizado quimicamente (com a adição do Cimento CP V ARI).

A parte experimental da pesquisa foi realizada no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP, localizado na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

O programa experimental dessa pesquisa foi dividido em duas etapas. A primeira etapa destinou-se a obtenção, preparação e caracterização do solo. A segunda etapa teve como objetivo a análise da resistência mecânica do solo no estado, estabilizado, por meio do ensaio de resistência à compressão simples. Os fluxogramas apresentados nas Figuras 6 e 7 mostram o programa de pesquisa e o programa experimental adotado para esse trabalho.

Figura 6: Fluxograma da pesquisa

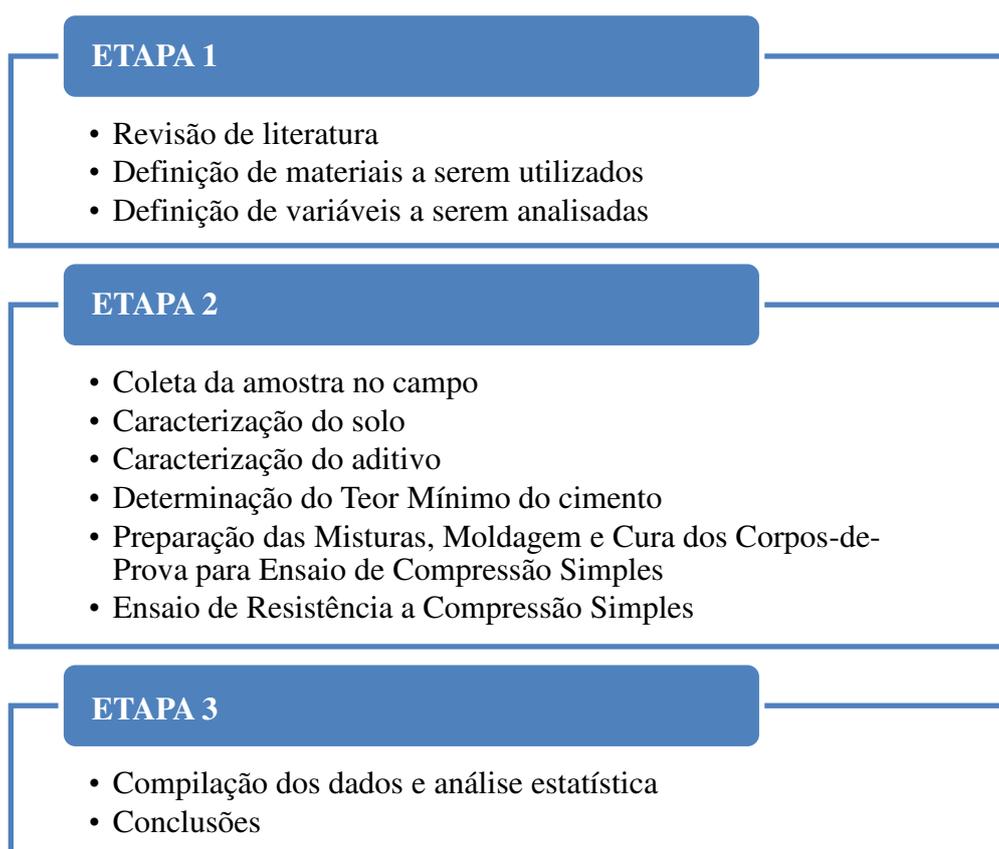
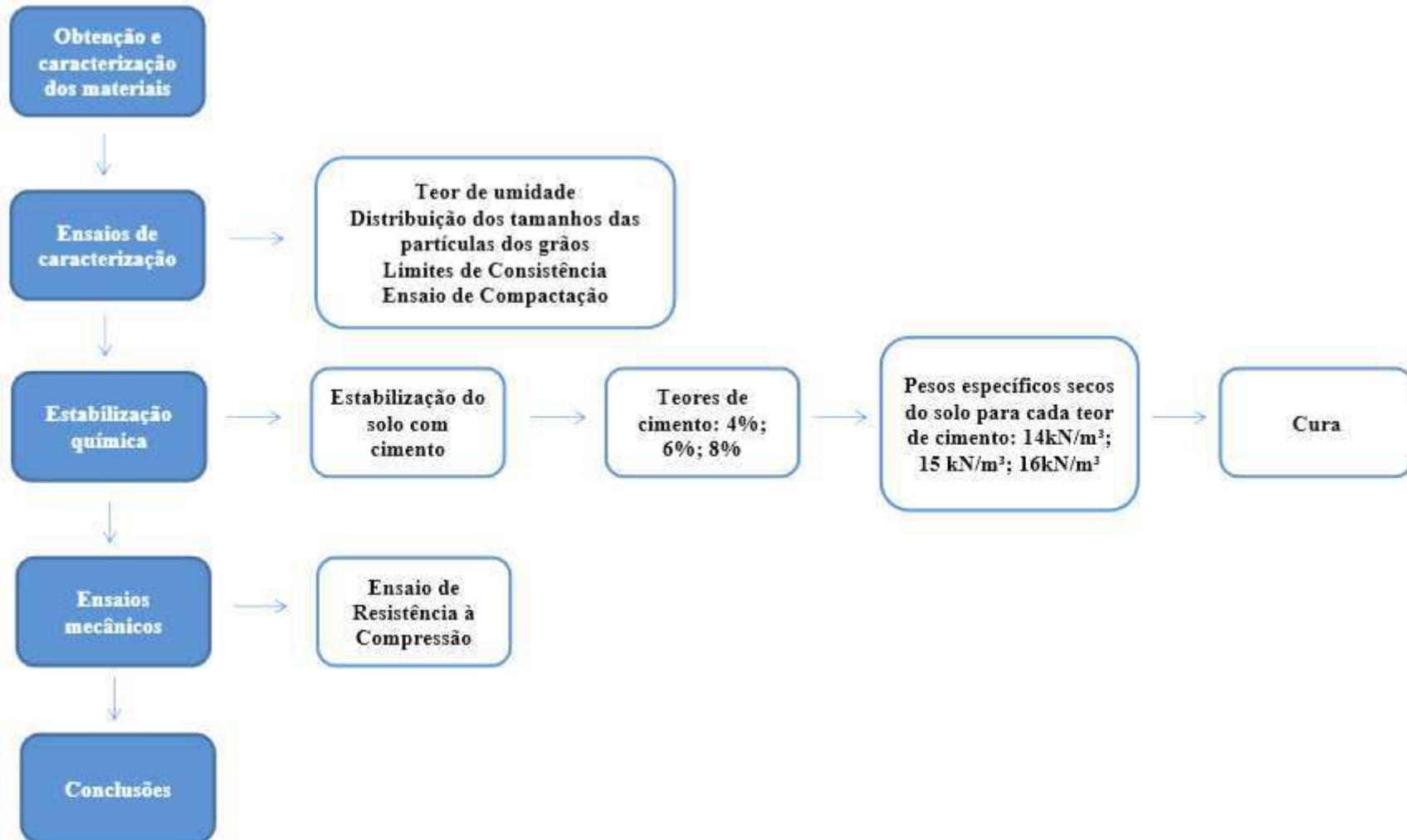


Figura 7: Fluxograma do programa experimental da pesquisa



4.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa (Figura 8) foi proveniente de um depósito de solo expansivo não saturado próximo à cidade de Paulista, situada a 20 km ao norte de Recife – PE na região litorânea do nordeste do Brasil.

Figura 8: Solo utilizado na pesquisa



4.2 Cimento

Para a pesquisa foi utilizado o cimento Portland, classificação determinada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas como CP V- ARI (ABNT, 1991).

Foi escolhido por conseguir atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquiere elevadas resistências, com maior velocidade. O cimento continua ganhando resistência até os 28 dias, atingindo valores mais elevados que os demais, proporcionando maior rendimento ao concreto.

Além disso, o CP V- ARI, também, não contém adições (porém pode conter até 5% em massa de material carbonático). Pode ter a seguinte composição, conforme a mistura que for preparada (Tabela 2):

Tabela 2: Composição e informação sobre ingredientes

Componente	Faixa de concentração (%)	Número CAS
Silicato tricálcico	20-70.....	12168-85-3
Silicato dicálcico.....	10-60.....	10034-77-2
Ferro-aluminato de cálcio	5-15	12068-35-8
Sulfato de cálcio	2-8	vários
Aluminato tricálcico.....	1-15	12042-78-3
Carbonato de cálcio	0-10	1317-65-3
Óxido de magnésio	0-6	1309-48-4
Óxido de cálcio	0-2	1305-78-8

Fonte: Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos - FISPQ (NBR 14725) –Cimento Itambé

O número CAS ou registro CAS (CAS number ou CAS registry number, em inglês) de um composto químico é um número de registro único no banco de dados do Chemical Abstracts Service, uma divisão da Chemical American Society.

A escolha do estabilizante químico (cimento) foi definida a partir dos parâmetros de economia e tempo de execução, além do fato dos componentes químicos conferirem maior coesão aos solos devido à cimentação e aglutinação das partículas, firmando a estrutura e diminuindo o tamanho dos poros.

Será utilizada água destilada para a realização dos ensaios em laboratório que assim exigirem, e água potável, proveniente da rede pública, para outros fins.

4.3 Definição das Variáveis

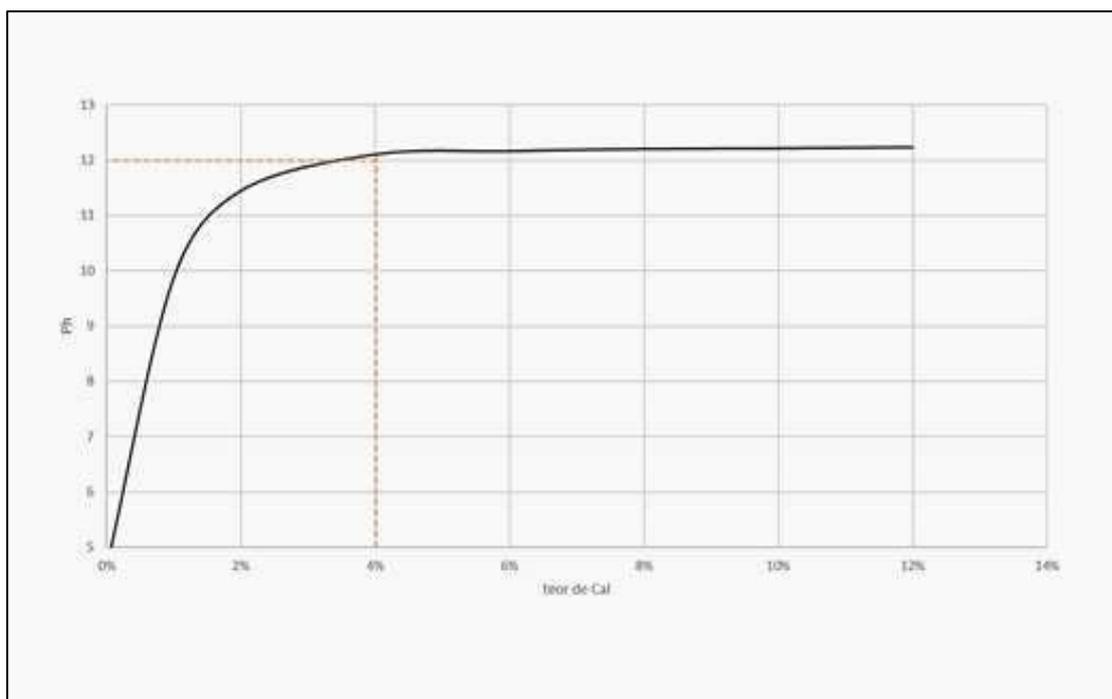
As variáveis, que cercam o problema da pesquisa, foram divididas em três categorias, conforme o tratamento que será dado a elas.

4.3.1 Variáveis Investigadas

As variáveis que terão seus níveis variados a fim de encontrar respostas sobre sua participação nas reações da mistura estão listadas na Tabela 3.

O teor de cimento, como esta pesquisa faz parte de um trabalho maior, foi escolhido para se igualar aos teores de cal estudados para estabilizar o solo em questão. O teor mínimo de cal foi escolhido com base no ICL. Este método é uma variação do método proposto por Eades e Grim (1996 apud THOME, 1999), o qual consiste em adicionar cal à mistura e realizar medidas do pH da mesma. Pelo método ICL, o teor mínimo é aquele que leva a um valor máximo de pH. O solo estudado como pode ser observado na figura 6, possui ICL de 4%, logo foram adotados os teores de 4, 6 e 8% de cal e repetidos de teores para o cimento desta pesquisa, para comparação dos efeitos dos diferentes agentes cimentantes.

Figura 9: Escolha do teor mínimo de cal – ICL



O γ_d e a umidade foram escolhidos de acordo com a curva de compactação apresentada na Figura 10:

Figura 10: Escolha dos pontos de umidade e peso específico seco para a pesquisa

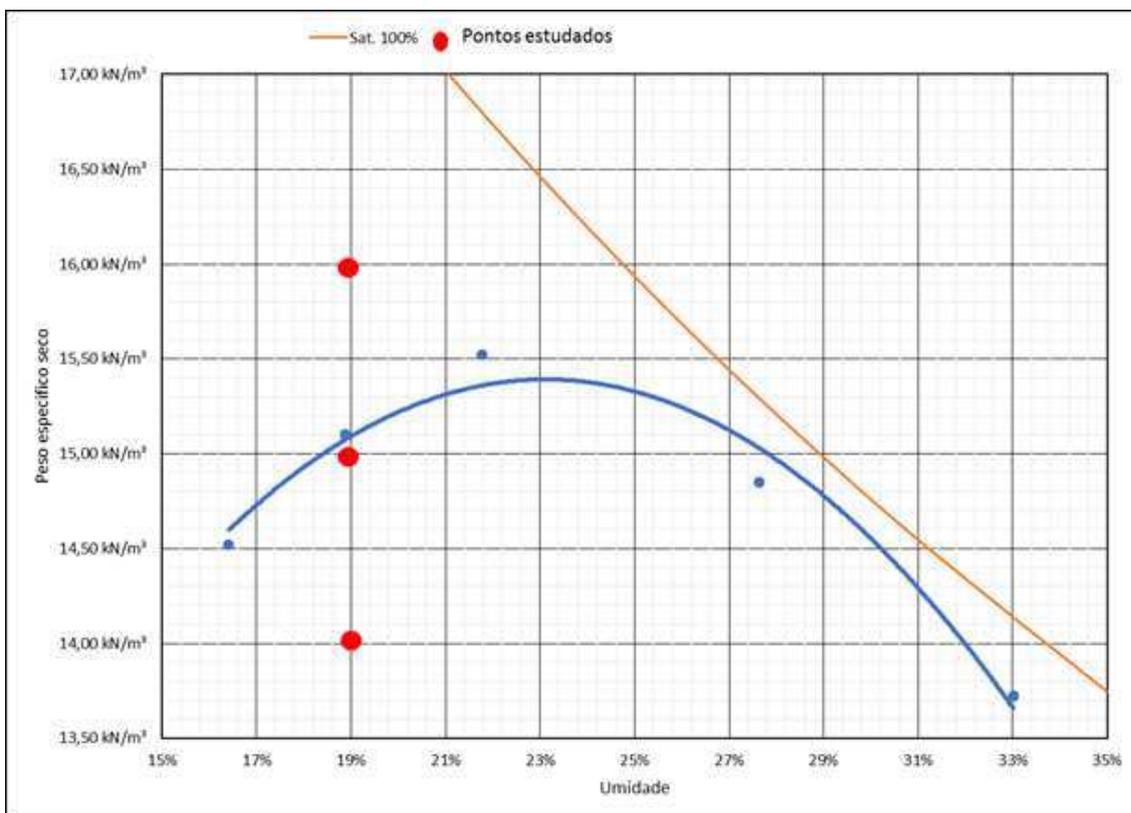


Tabela 3: Variáveis Investigadas no Programa Experimental

VARIÁVEL	UNIDADES DE MEDIÇÃO	NÍVEIS ADOTADOS
Teor de cimento	%	4; 6; 8
Densidade de compactação	kN/m ³	14; 15; 16

4.3.2 Variáveis Fixadas

As variáveis da Tabela 4 serão mantidas fixas ao longo de todo o experimento.

Tabela 4: Variáveis Fixadas no Programa Experimental

VARIÁVEL	UNIDADES DE MEDIDA	NÍVEL ADOTADO
Tipo de solo	%	100% de Solo Expansivo proveniente da região de Paulista – PE
Tipo de aditivo	-	CP V-ARI
Umidade de compactação	%	21,80

4.3.3 Variáveis de ruído

Estes são fatores ligados ao meio ambiente e aos equipamentos usados, que podem ser minimizados, mas dificilmente eliminados, podendo assim gerar distorções nas variáveis de resposta. A estratégia geral para controle dos fatores de ruído é a aleatorização completa da ordem de realização dos ensaios.

Tabela 5: Variáveis de Ruído no Programa Experimental

VARIÁVEL	MEDIDA DE CONTROLE
Variações na Temperatura de Cura	Cura em câmara úmida
Equipamento e operador	Utilização de um único equipamento com único operador
Umidade do ambiente	Cobrir amostra em pano úmido

4.3.4 Variáveis de resposta

A variável será medida no experimento visando o estabelecimento de relações causais. No processo em estudo, será a resistência à compressão simples.

4.4 Métodos

Analisou-se para essa pesquisa o comportamento do solo ensaiado com adições de 4%, 6% e 8% de Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI).

No intuito de garantir a qualidade da dosagem procedeu-se com um adequado procedimento de cura do material até que fossem alcançadas as características desejadas nessa pesquisa.

Para que os objetivos sugeridos por essa pesquisa fossem alcançados foram adotadas metodologias e informações contidas na literatura. Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O trabalho contemplou ensaios de caracterização física do solo e ensaios para verificação da resistência mecânica.

4.4.1 Ensaios de caracterização do solo

As amostras foram coletadas de maneira deformada de acordo com as recomendações gerais da NBR 9604 (ABNT, 2016), e armazenadas em sacos plásticos para preservação do seu teor de umidade natural. Posteriormente, foram secadas ao ar, destorroadas e passadas na peneira N° 4 (4.8mm) para o ensaio de compactação, ou peneira N° 10 (2,0mm) para a moldagem dos corpos de prova e para os ensaios de compressão simples, segundo a NBR 12770 (ABNT, 2014).

Para a pesquisa foram realizados ensaios de caracterização física denominados de distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos, massa específica real dos grãos, limites de consistência e ensaio de compactação. Os experimentos aconteceram no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

4.4.2 Preparação das amostras de solo para ensaios de compactação e caracterização

A preparação foi regida pela norma NBR 6457 (ABNT, 2016). Foram realizados os métodos para preparo das amostras de solo para os ensaios de compactação e de caracterização

(análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e plasticidade, massa específica e umidade hidrocópica).

4.4.3 Distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos

Para caracterização física do solo foi realizado ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação, normatizado pela da NBR 7181 (ABNT, 2018) - Solo - Análise granulométrica. Para este procedimento o material foi misturado e quarteado sendo posteriormente submetido ao peneiramento em uma série-padrão de peneiras, com aberturas de malhas sequenciadas. A partir dos resultados dos ensaios mencionados foi possível a construção da curva de distribuição granulométrica, imprescindível para estabelecer a classificação do solo.

4.4.4 Ensaio de limite de liquidez (LL)

Foi determinado o valor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico. Esse limite foi definido com auxílio do aparelho de Casagrande no qual se determina o teor de umidade que, com 25 golpes, une os bordos inferiores de uma canelura (um centímetro de comprimento) aberta, na massa de solo, por um cinzel de dimensões padronizadas. A execução do ensaio foi normatizada pela NBR 6459 (ABNT, 2016).

4.4.5 Ensaio de limite de plasticidade (LP)

O ensaio foi executado nos moldes na norma NBR 7180 (ABNT, 2016). Foi determinado o valor de umidade na qual o solo passa do estado plástico para o estado semi-sólido. É o limite no qual o solo começa a se quebrar em pequenas peças, quando enrolado em bastões de 3 mm de diâmetro. Ou seja, é o menor teor de umidade em que o solo se comporta plasticamente.

4.4.6 Ensaios de Compactação Proctor

Para a pesquisa foi realizado o ensaio de compactação dinâmica original (Proctor Standard), utilizando a energia normal. O ensaio consistiu em compactar as amostras de solo puro com porcentagens crescentes de umidade. Para tanto, utilizou-se um molde cilíndrico padrão, onde foi inserido cinco camadas de solo (cada uma ocupando 1/5 da altura do cilindro), as quais recebiam o número de golpes do soquete correspondente a energia empregada. O ensaio foi regido pela norma NBR 7182 (ABNT, 2016).

4.4.7 Ensaio envolvendo a mistura de solo-cimento

4.4.8 Preparação das Misturas, Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova para Ensaio de Compressão Simples

A moldagem ocorreu em três camadas, compactadas estaticamente e com escarificação do topo, para garantir boa aderência entre as camadas. Depois de compactados, os corpos de prova foram retirados dos moldes, pesados e medidos. Logo após, foram armazenados em sacos plásticos e deixados curar por 28 dias em câmara úmida. Os corpos de prova cilíndricos moldados na compactação estática apresentaram dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Figura 11: Moldagem do corpo de prova – Compactação



Figura 12: Corpo de prova após a compactação, antes do desmolde



Figura 13: Corpo de prova desmoldado, na etapa de medição e pesagem



4.4.9 Ensaio de resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples foi utilizado nesta pesquisa visando analisar o efeito da estabilização química no solo. Após a cura por 28 dias, os corpos de prova foram imersos em água por 24 horas antecedentes ao ensaio de compressão simples, para garantir minimização da sucção.

Deste modo, os valores obtidos nesse ensaio serviram de referência para mostrar a evolução da resistência ao se adicionar percentagens de aditivos em relação ao peso seco de solo.

Para o ensaio de resistência à compressão simples foi utilizada uma prensa automática da SHIMADZU AG-IS com velocidade de 1% por minuto.

Figura 14: Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão simples



5 RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios obtidos na fase experimental da pesquisa. Primeiramente são apresentados os resultados de caracterização física do solo: distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos, massa específica real, limites de Atterberg, sendo discutidos ainda os resultados das curvas de compactação. Posteriormente são demonstradas as análises referentes aos ensaios de resistência mecânica, o ensaio de resistência à compressão simples.

5.2 Ensaio de Caracterização Física

Os ensaios de caracterização física (distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos, massa específica real dos grãos, limites de consistência, ensaio de compactação e ensaio de curva característica) foram importantes para identificar não só a natureza do solo, mas também parâmetros importantes para compreender o comportamento real do solo pesquisado.

5.2.1 Distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos

As Figuras 12 e 13 apresenta a curva de distribuição dos tamanhos das partículas do solo pesquisado com a etapa de sedimentação realizada sem e com defloculante, respectivamente. As Tabelas 7 e 8 apresentam a composição do solo a partir do ensaio de sedimentação realizado sem e com defloculante.

Figura 15: Curva granulométrica do solo – sem defloculante

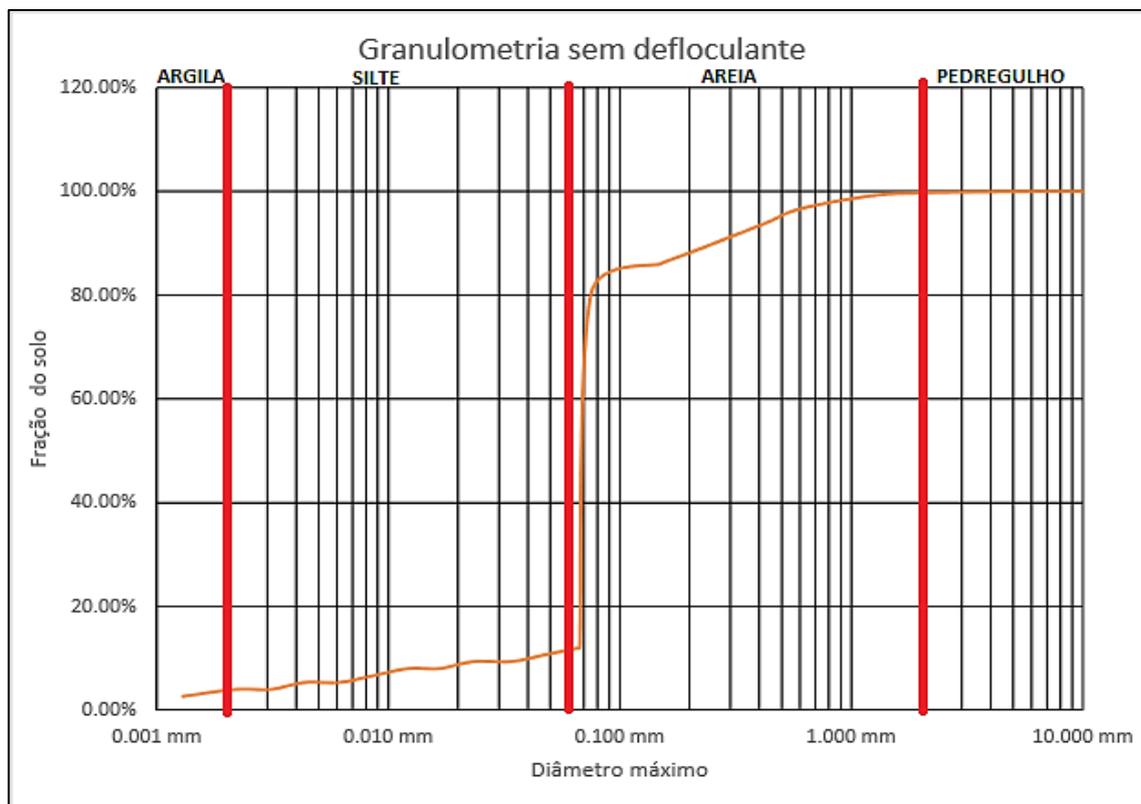


Tabela 6: Composição do solo (sem defloculante)

Composição (ABNT NBR 7181)		
Areia	Silte	Argila
19,84%	76,14%	4,02%

Figura 16: Curva granulométrica do solo – com defloculante

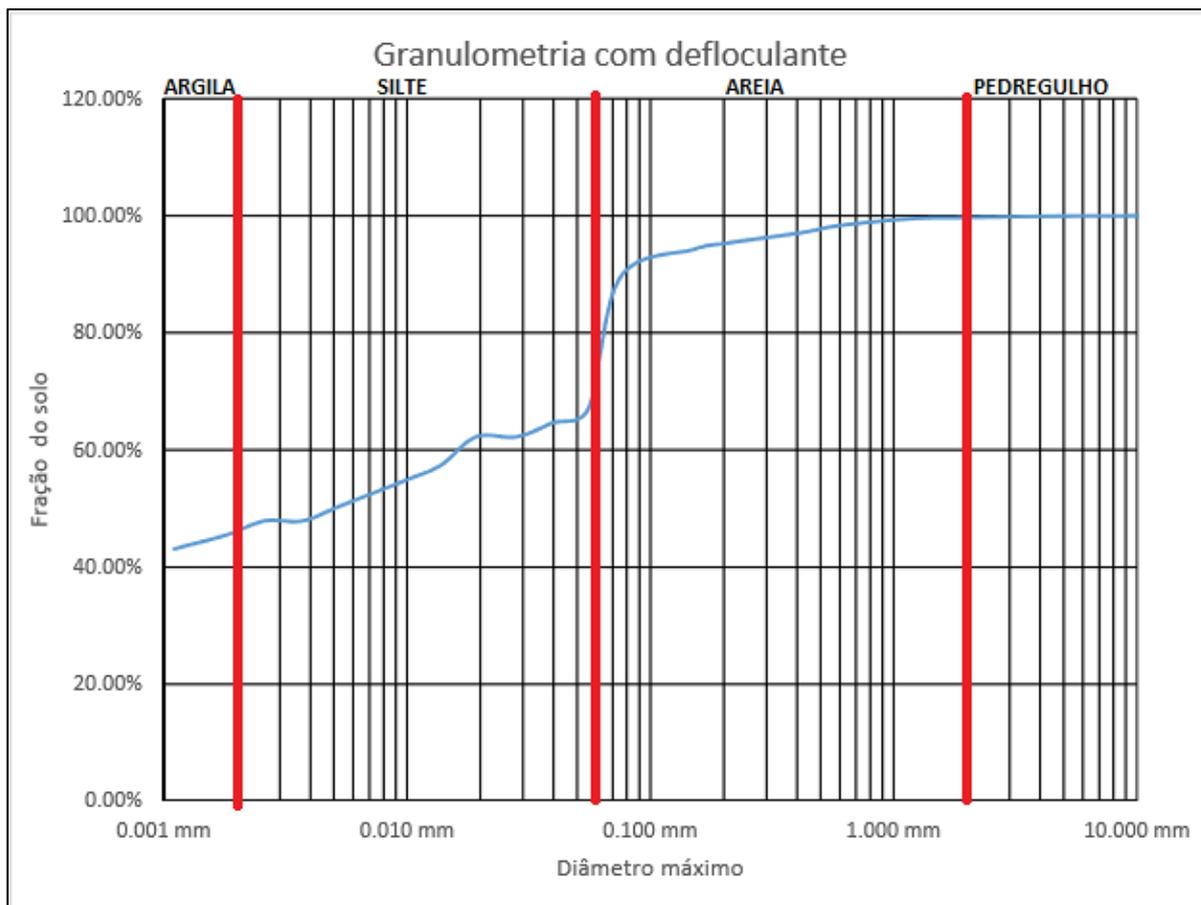


Tabela 7: Composição do solo (com defloculante)

Composição (ABNT NBR 7181)		
Areia	Silte	Argila
10,58%	43,96%	45,46%

A curva de granulometria apresenta-se descontínua, pode-se observar uma parte verticalizada indicando a falta de uma faixa granulométrica no ensaio. O solo se mostra predominantemente argiloso. No ensaio feito sem defloculante o solo possui mais silte, e com o defloculante o solo apresenta mais argila. Isso mostra a importância do uso do defloculante para separar grãos mais finos que estão agrupados, mostrando assim a composição real do solo.

5.2.2 Determinação do peso específico dos grãos do solo

A Tabela 9 apresenta os valores de massa específica do solo e os índices de consistência.

Tabela 8: Limites de Atterberg e massa específica real do solo

Massa específica	Limite de plasticidade	Limite de liquidez	Índice de plasticidade
2,65 g/cm ³	20,67%	49,44%	28,77%

O valor médio da massa específica real dos grãos do solo foi de 2,65 g/cm³. Segundo Jacintho et al. (2012) dependendo do tipo de rocha e da intemperização que origina um solo, ou seja, de acordo com a mineralogia, o valor da massa específica real pode variar a depender do local. Regiões de clima tropical, geralmente, apresentam solos com massa específica real dos grãos próxima de 3,0 g/cm³, estando o valor para o solo ensaiado nesta pesquisa (2,65 g/cm³) em conformidade com a literatura.

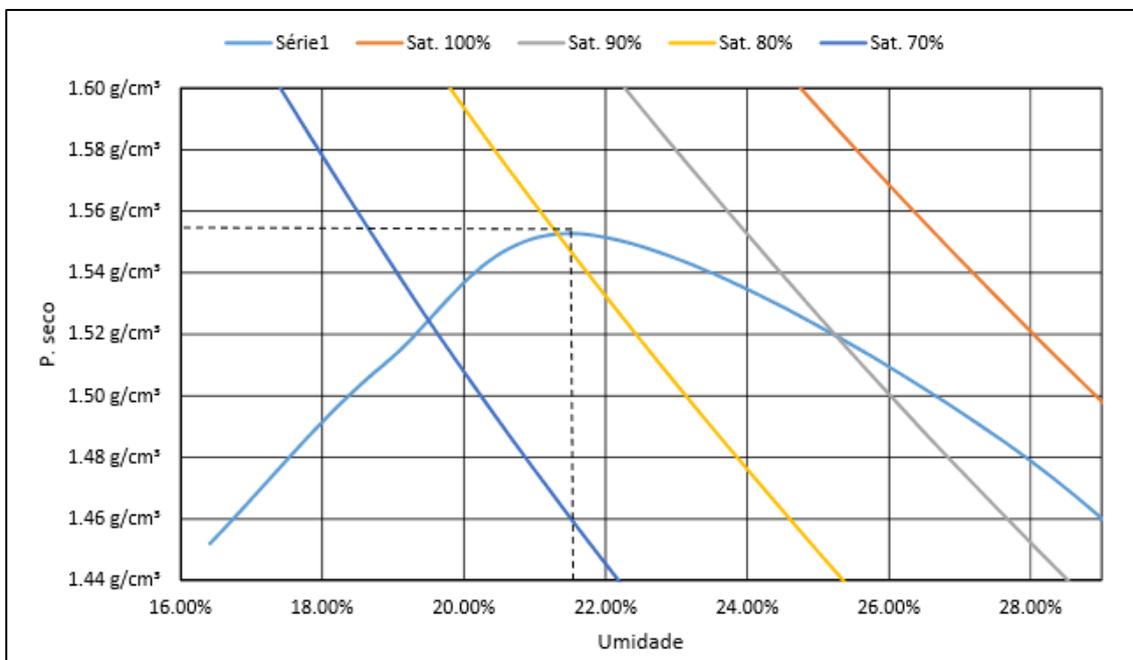
Para caracterizar melhor o comportamento do solo ensaiado realizaram-se além da análise da distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos, avaliações dos índices de consistência do material, onde se observou que ao modificar a umidade da amostra ocorriam de forma gradual, mudanças de estado físico, sendo o Limite de Liquidez (LL) resultante de 49,44% e o Índice de Plasticidade (IP) 28,77%.

A partir dos resultados da análise granulométrica e dos limites de Atterberg foi possível realizar a classificação do solo. Esse foi classificado pela metodologia Highway Research Board (HRB) como material argiloso (A-7-6) e pelo método do Sistema Unificado de Classificação de solos (SUCS) como argila inorgânica de mediana plasticidade (CL) com baixa compressibilidade.

5.2.3 Curva de compactação

A Figura 14 apresenta a curva de compactação do solo ensaiado para a energia normal.

Figura 17: Curva de compactação do solo



A partir da análise da Figura 14, temos os valores de umidade ótima (21,80%) e peso específico seco máximo (15,5 kN/m³) para o solo estudado.

A Figura 14 também apresenta as curvas de saturação do solo, as quais correspondem ao lugar geométrico dos valores de umidade ótima e massa específica aparente seca para o qual o solo encontra-se saturado.

A curva de saturação é um limite superior para as curvas de compactação de solo, assim o gráfico apresentado para o solo ensaiado demonstra que os pontos ótimos das curvas de compactação situam-se em torno de 80% a 90% de saturação, ou seja, o solo encontra-se com 80% a 90% dos seus vazios preenchidos por água, tendendo a total expulsão do ar no interior do solo.

5.3 Ensaio Mecânico

O ensaio laboratorial de resistência mecânica do solo: ensaio de compressão simples constituiu uma etapa de relevância para a presente pesquisa.

A caracterização do comportamento tensão-deformação do solo estudado auxiliou para uma compreensão mais racional do comportamento do solo quando submetido a diferentes níveis de tensões.

5.3.1 Ensaios de compressão simples

Os corpos de prova ensaiados à compressão simples têm suas características demonstradas na Tabela 10.

Baseados nos dados que compõem a tabela 10, formularam-se as Figuras 15 a 18. A Figura 15 apresenta as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cimento. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco.

Os dados exibidos na Figura 15 permitem verificar que, para as amostras curadas 28 dias, quanto maior o teor de cimento maior a resistência à compressão simples e esta variação é linear, dentro dos teores estudados. Para o mesmo peso específico aparente seco, comparamos diferentes teores de cimento. Fixando o teor de cimento, observou-se também que quanto mais compactado o solo (quanto maior a massa específica aparente seca) maior a resistência à compressão simples (q_u).

Tabela 9: Dados gerais dos corpos de prova

Nº CP	Teor de cimento	Massa específica aparente seca	Teor de umidade	Cimento	Porosidade	η /Civ	q_u (kPa)
C1	4%	1,60 g/cm ³	19,21%	2%	40%	17,23	-
C2	4%	1,60 g/cm ³	19,21%	2%	39%	16,17	-
C3	4%	1,60 g/cm ³	18,50%	2%	39%	16,64	187,17 kPa
C4	4%	1,50 g/cm ³	16,84%	2%	42%	18,86	178,64 kPa
C5	4%	1,50 g/cm ³	16,84%	2%	41%	17,62	154,96 kPa
C6	4%	1,50 g/cm ³	16,53%	2%	42%	18,65	-
C7	4%	1,40 g/cm ³	16,53%	2%	46%	21,51	-
C8	4%	1,40 g/cm ³	16,50%	2%	45%	21,18	294,62 kPa
C9	4%	1,50 g/cm ³	16,92%	2%	42%	18,56	-
C10	4%	1,50 g/cm ³	16,92%	2%	42%	18,49	-
C11	4%	1,40 g/cm ³	16,23%	2%	46%	21,90	86,56 kPa
C12	4%	1,40 g/cm ³	16,22%	2%	45%	20,75	95,62 kPa

C13	4%	1,50 g/cm ³	17,81%	2%	43%	18,96	247,79 kPa
C14	6%	1,60 g/cm ³	14,42%	4%	38%	10,60	1213,69 kPa
C15	6%	1,60 g/cm ³	14,42%	4%	38%	10,48	-
C16	6%	1,60 g/cm ³	14,42%	4%	38%	10,45	-
C17	6%	1,50 g/cm ³	11,02%	3%	42%	12,53	205,58 kPa
C18	6%	1,50 g/cm ³	16,09%	3%	43%	13,01	403,35 kPa
C19	6%	1,50 g/cm ³	16,09%	3%	45%	14,43	184,92 kPa
C20	6%	1,40 g/cm ³	15,54%	3%	46%	14,69	226,55 kPa
C21	6%	1,40 g/cm ³	17,58%	3%	45%	14,37	207,67 kPa
C22	6%	1,40 g/cm ³	17,58%	3%	46%	14,91	241,02 kPa
C23	8%	1,60 g/cm ³	16,01%	5%	38%	8,12	1080,47 kPa
C24	8%	1,60 g/cm ³	16,01%	5%	38%	8,28	943,34 kPa
C25	8%	1,60 g/cm ³	16,01%	5%	39%	8,37	1021,77 kPa
C26	8%	1,50 g/cm ³	17,70%	4%	43%	9,90	836,90 kPa
C27	8%	1,50 g/cm ³	17,70%	4%	42%	9,59	769,67 kPa
C28	8%	1,50 g/cm ³	17,70%	4%	42%	9,61	1086,84 kPa
C29	8%	1,40 g/cm ³	15,72%	4%	44%	10,48	477,34 kPa
C30	8%	1,40 g/cm ³	15,72%	4%	45%	11,00	305,96 kPa
C31	8%	1,40 g/cm ³	15,72%	4%	47%	11,63	261,52 kPa

Figura 18: Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cimento das amostras

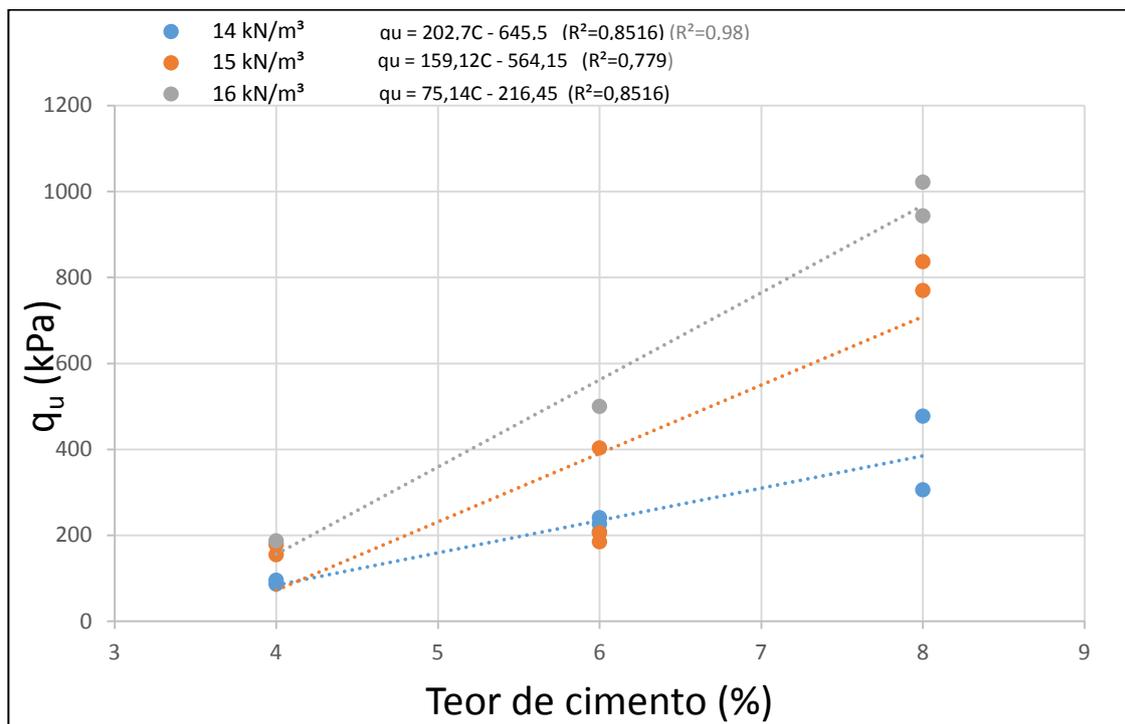
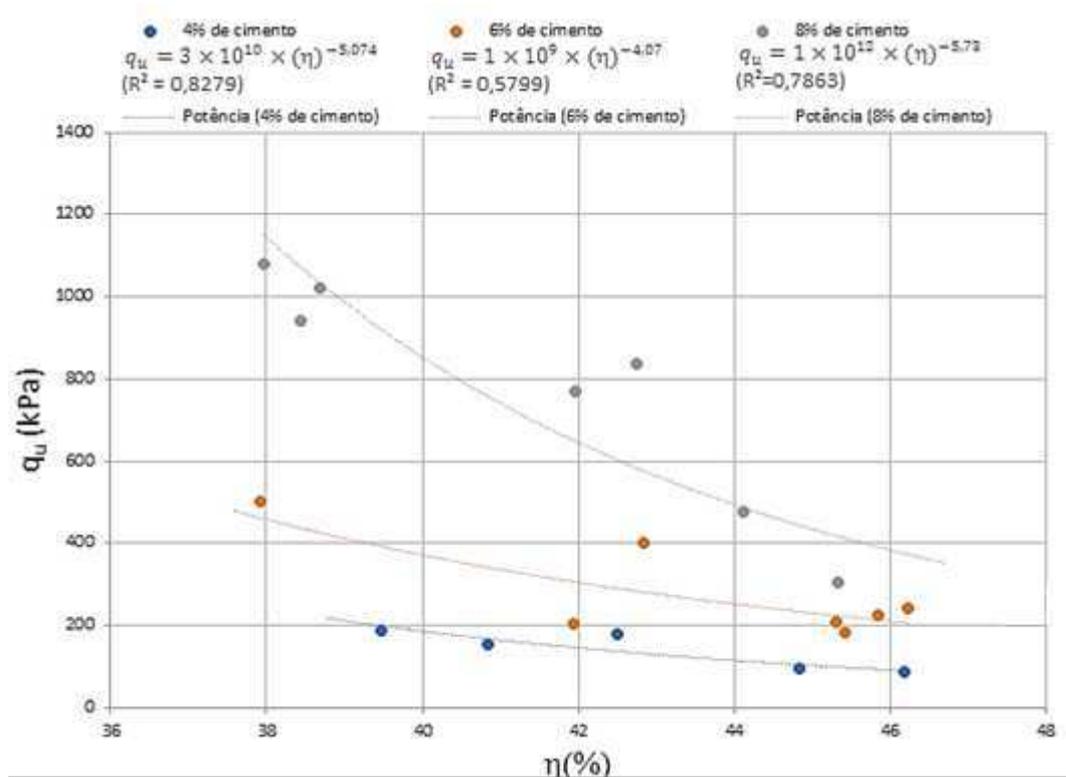


Figura 19: Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade dos corpos de prova curados



A Figura 16 apresenta a variação da resistência à compressão simples devido à variação porosidade dos corpos de prova. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cimento. Esta figura nos permite observar que a redução na porosidade da mistura compactada promove o aumento da resistência à compressão simples do solo-cimento estudado, independentemente da quantidade de cimento utilizado. Observou-se novamente (com a porosidade fixada), que quanto maior o teor de cimento maior a resistência à compressão simples (q_u).

Foram associados os dados da resistência a compressão simples com a variação da relação porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}), como pode ser observado nas Figuras 17 e 18.

As Figuras 17 e 18 expõem a variação de resistência à compressão simples das amostras curadas. Cada uma das curvas da Figura 17 possui um teor de cimento (4%, 6% e 8%). Observou-se que as curvas possuem comportamento único, assim foi possível apresentá-las de forma unificada na Figura 18.

Uma análise que pôde ser feita com a Figura 17 foi a observação de dois pontos de diferentes teores e massa específicas que tenderam para o mesmo valor de resistência à compressão simples. O ponto 1 possui 8% de teor de cimento e $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$, e o ponto 2 possui 6% de teor de cimento e $\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$. Os dois pontos estão aproximados ao valor de resistência de 477,34 kPa. Pode-se analisar mais uma vez que para maior compactação ou maior teor de cimento obtém-se maiores valores de resistência. Além disso, essa observação pode fazer parte da escolha do procedimento de melhoramento de solo a ser utilizado em uma obra: utilizar mais cimento ou maior compactação. Essa decisão dependerá do prazo e do capital da obra. Logo a relação η/C_{iv} pode ser usada para dosar a mistura solo cimento estudada.

Figura 20: Relação entre porosidade/teor volumétrico de cimento e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados (curvas para cada teor)

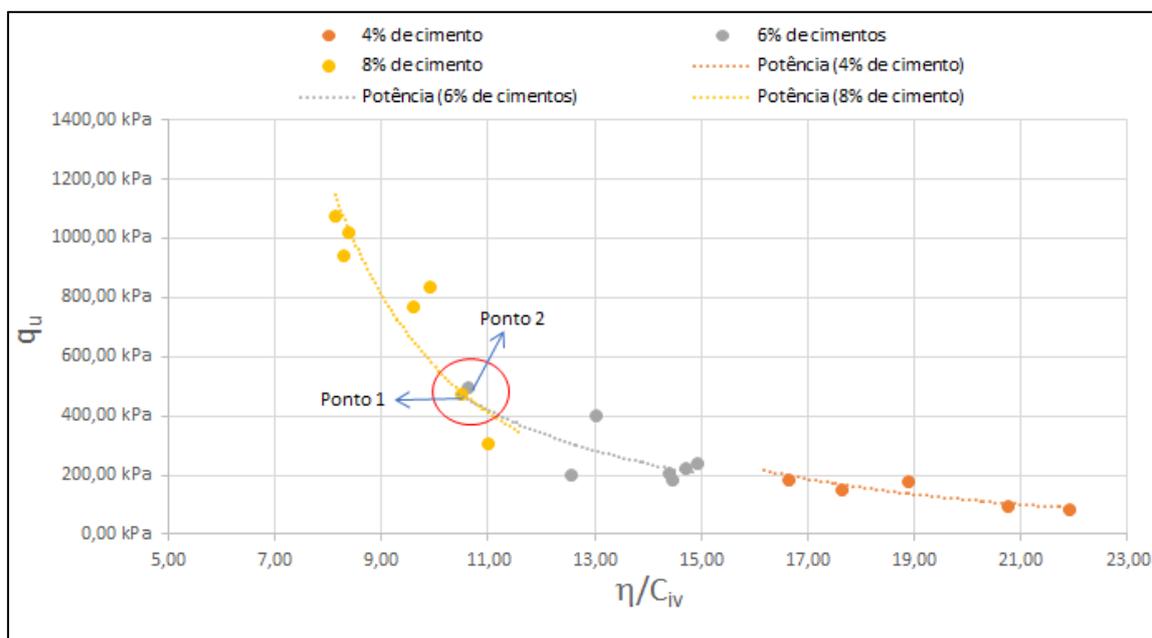
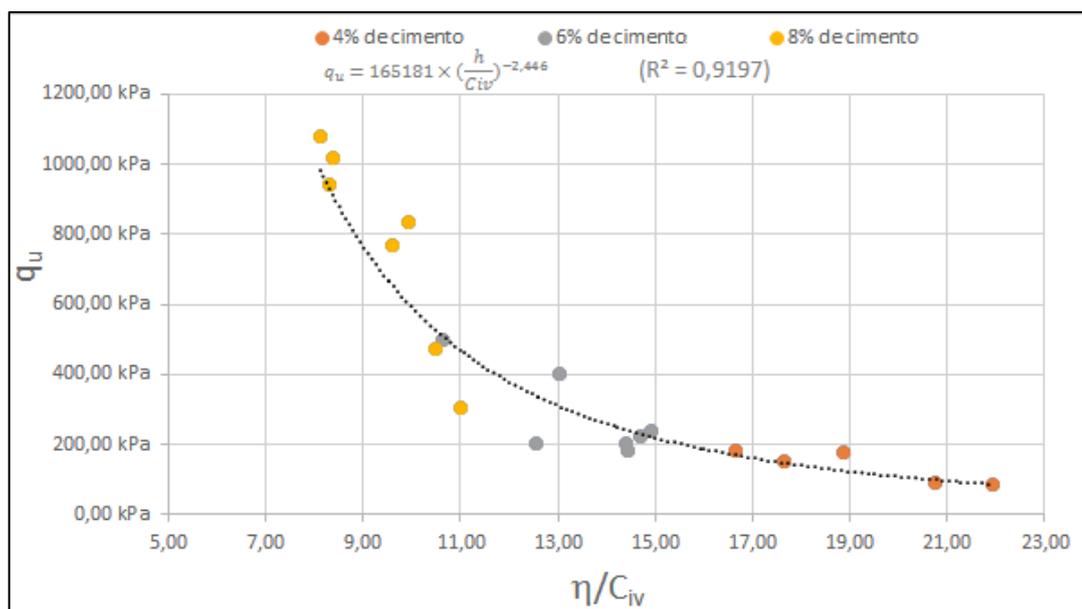


Figura 21: Relação entre porosidade/teor volumétrico de cimento e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados (curva unificada)



6 CONCLUSÕES

Com a finalização da pesquisa, foi possível concluir os objetivos propostos. Dentre eles, a caracterização geotécnica do solo analisado. Esse estudo foi realizado antes dos processos de melhoramento do solo com o cimento Portland. O solo estudado trata-se de uma argila inorgânica de mediana plasticidade (CL) com baixa compressibilidade.

A eficiência da estabilização com cimento Portland (CP V ARI) foi apresentada através dos gráficos de resistência à compressão simples *versus* teor de cimento, porosidade e porosidade/teor volumétrico de cimento. Com os resultados, foi possível afirmar que o cimento mostrou-se eficiente adicionado ao solo em questão. Com relação ao teor adicionado, para um mesmo peso específico aparente seco, quanto mais cimento adicionado à mistura, maior a resistência à compressão simples. Quanto ao peso específico aparente seco (γ_d), observou-se que quanto maior a compactação do solo (maior γ_d), maior a resistência.

A relação da porosidade da mistura compactada e do teor de agente cimentante volumétrico (η/C_{iv}) mostrou-se a melhor maneira de obter uma correlação única que permita a previsão de comportamento das amostras curadas a todas as porosidades e teores de cimento estudados.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Estudar se o coeficiente η/C_{iv} pode ser usado para prever a resistência à compressão simples desse material em outros tempos de cura;
- Avaliar se o coeficiente η/C_{iv} pode ser usado para dosar a resistência a tração na compressão diametral de um solo expansivo;
- Comparar os resultados de resistência obtidos com adição de cimento ao solo estudado com os resultados da adição de cal ao solo estudado;
- Análise econômica da estabilização do solo com cal e cimento na busca da solução mais adequada.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G.B.O. Incorporação de Escória de Cobre Pós-Jateada a um Solo Areno Argiloso de Sergipe para Aplicação em Base de Pavimentos. 2016. 193f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: PUC-Rio. Rio de Janeiro- RJ, 2016.

BATISTA, C. de F. N. Pavimentação. Compactação de Solos no Campo; Camadas de Base; Estabilização de Solos. Tomo II, 2. ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1976. 178 p.

CASAGRANDE, M.D.T. Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais. 2001. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) -Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre- RS, 2001.

CHANG, T.S.; WOODS, R.D. Effect of particle contact bond on shear modulus. Journal of Geotechnical Engineering. v. 118, n. 8, p. 1216- 1233, 1992.

CRUZ, M.L.S. Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento. 2004. 2012f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade do Minho. Guimarães, 2004.

DALLA ROSA, A. Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal. 2009. 200f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2009.

DIAS, J.J.F.M.S, Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas. 2012. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade nova de Lisboa. Portugal, 2012.

FERREIRA, S. R. M. Colapso e Expansão em Solos Naturais não Saturados Devido à Inundação. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1995, 381p.

FERREIRA, J.L.F. Análise de estabilidade de taludes pelo método de Janbu e Spencer. 2012. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Faculdade de Engenharia Universidade do Porto para obtenção do título mestre em Engenharia Civil. Porto, Portugal, 2012.

FOPPA, D. Análise de variáveis chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados. 2005. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre -RS, 2005.

Justino da Silva, J. M. (2001). Variação Volumétrica de uma Argila Contráctil-Expansiva Não Saturada Submetida a Diferentes Condições Climáticas. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 249 p.

LIMA, T. V. Estabilização de solos argilosos para a produção de blocos ecológicos. 2009. 12f. IME – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro – RJ, 2009.

MACÊDO, M. M. Solos modificados com cimento – Efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos. 2004. 309f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife – PE, 2004.

Neves, J. M. C. Estabilização de solos com cal – Estudo e aplicações rodoviárias. 1993. Dissertação (Mestrado). Universidade Nova Lisboa. Lisboa, 1993.

OLIVEIRA, E. Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG. 2010. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis -SC, 2010.

RACANA, N; GOURVES, R; GREDIAC, M. Mechanical behaviour of soil reinforced with geocells. International Symposium on Earth Reinforcement. Japão. p. 437 – 442, 2001.

RODRIGUES, M.G.M. Contribuição ao estudo do método físicoquímico de dosagem do solo-cimento. 1992. 193p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro- RJ, 1992.

SANTOS, G. M. Estudo do comportamento histerético de uma argila expansiva não-saturada. 2008. 139f. Universidade Federal de Pernambuco. Recife – PE, 2008.

SANDRONI, S., CONSOLI, N. C. Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com Dois Solos Difíceis: Os Extremamente Moles e os Expansivos. COBRAMSEG 2010. Anais. PP. 97– 186. 2010.

SARTORI, G. Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão. 2015. 54f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná para obtenção do título bacharel em Engenharia Civil. Campo Mourão, 2015.

SCHREINER, H. D. (1987). “State of the art review on expansive soils”. Imperial College, London.

THOMÉ, A. Comportamento de Fundações Superficiais Apoiadas em Aterros Estabilizados com Resíduos Industriais. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.1999.

Vargas, M., Gonçalves, H.H., Santos, N.B. e Marinho, F. A.M.(1989). Expansive Soils in Brazil. Supplementary Contributions by the Brazilian Society for Soil Mechanics. 12th ICSMFE. Rio de Janeiro – RJ, 1989.

