



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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM SOLO DO MUNICÍPIO DE
PAULISTA-PE ESTABILIZADO COM CIMENTO PORTLAND E RESÍDUO
DO POLIMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

Paula Almeida Aguiar

CAMPINA GRANDE – PB

2019

PAULA ALMEIDA AGUIAR

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM SOLO DO MUNICÍPIO DE
PAULISTA-PE ESTABILIZADO COM CIMENTO PORTLAND E RESÍDUO
DO POLIMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

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

Campina Grande – PB

2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autora: Paula Almeida Aguiar

Título: AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM SOLO DO MUNICÍPIO DE PAULISTA-PE ESTABILIZADO COM CIMENTO PORTLAND E RESÍDUO DO POLIMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

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:

Pela Banca Examinadora:

Orientadora: Prof. D.Sc. Carina Silvani

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. Dra. Aline Figueirêdo Nóbrega de Azeredo

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Francisco de Assis da Costa Neto

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Alexandre de Souza Júnior

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que me deu forças até o momento para persistir em algo que, em diversos momentos, duvidei ser capaz de cumprir. Ele, acompanhado da Virgem Maria, com amor e compaixão, mostraram-me os caminhos certos que eu deveria seguir e confortaram meu coração nos momentos que mais me senti insegura.

À minha família que sempre esteve ao meu lado, aguentando toda ansiedade e estresse com paciência e muito amor. Mãe, você é um exemplo de mulher e mãe. Espero um dia ser metade do grande ser humano que a senhora é. Pai, do seu jeito único, me ensinou a seguir trilhando o caminho da educação e nos momentos mais difíceis me incentivou a chegar até o fim. Mariana, minha irmã, que desde pequena tento me espelhar. Enfim, à minha avó Assunção, que tem me ensinado a ser mais paciente com aqueles que amo.

Aos meus amigos Flávio, Raabi, Rayanne, Luanna, Paloma e Thamiris que participaram desde o início da minha vida acadêmica e que dividiram comigo momentos de alegria e angústia. Tudo isso tivemos que passar para chegarmos ao final dessa grande caminhada e nos tornarmos grandes profissionais.

Aos demais amigos e familiares que foram parte importante da minha trajetória. Saibam que sem o suporte de vocês, seria algo muito mais difícil de conquistar.

À minha orientadora Carina que teve toda paciência possível com meus erros e atrasos. Uma pessoa que realmente nasceu para exercer a profissão que escolheu. Obrigada por me fazer chegar até aqui.

Por fim, à todos os mestres que não somente fizeram parte da minha formação como engenheira, mas também como pessoa. Em especial à Leonel, engenheiro da obra que tive o prazer de estagiar e por quem irei ter um eterno carinho.

RESUMO

O seguinte trabalho aborda o método de estabilização de solos feito com estabilizantes químicos. Essa técnica baseia-se em adicionar aglomerantes ao solo no intuito de melhorar suas propriedades. Dentre os estabilizantes mais usados, tem-se o cimento que ao ser incorporado ao solo resulta em melhores valores de resistência e rigidez. O cenário atual de degradação do meio ambiente gera um grande incentivo para uso de resíduos industriais na construção civil. O resíduo de polimento de rochas ornamentais é um potencial estabilizante que se enquadra nessa categoria de materiais. Portanto, este trabalho objetiva estudar o comportamento de um solo expansivo ao ser estabilizado com o resíduo do polimento de mármore e cimento, assim como, promover um comparativo de custos entre esta técnica e a estabilização apenas com cimento e apenas com cal. O solo utilizado foi coletado do município de Paulista-PE e foi estabilizado com adições de 30%, 40% e 50% de resíduo. O teor de cimento e o peso específico seco foram fixados em 6% e 15 kN/m³, respectivamente. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples após 7 dias de cura. Os resultados indicaram que o resíduo de mármore é capaz de promover maior resistência ao solo conforme se eleva seu teor comparando-se com um solo estabilizado apenas com cimento. Observou-se um aumento de 30 kPa ao adicionar 30% de resíduo à mistura solo-cimento. Contudo, o solo estabilizado com a cal apresenta melhores resultados, tendo uma diferença de 400 kPa quando comparado com a adição de 50% de resíduo. Os custos para realizar a estabilização com os três tipos de estabilizantes químicos (cimento, cimento e resíduo e cal) também se mostraram mais favoráveis à cal.

Palavras-chave: Resíduo de Rochas Ornamentais, cimento, solo expansivo, estabilização de solo.

ABSTRACT

The following work addresses the soil stabilization method done with chemical stabilizers. This technique is based on adding stabilizers to the soil that does not have the characteristics and properties suitable for use in civil construction, in order to improve it. Among the most used stabilizers is the cement that when incorporated in the soil results in better values of strength and stiffness. However, there is a strong incentive in the current environment for the use of industrial waste in construction. The ornamental rock polishing residue is a potential stabilizer that falls within this category of materials. Therefore, this work aims to study the behavior of an expansive soil when stabilized with the marble polishing residue and the cement, as well as to promote a cost comparison between this technique and the stabilization with only cement and with only lime. The soil used was collected from the municipality of Paulista-PE and was stabilized with additions of 30%, 40% and 50% of residue. The cement content and the specific dry weight were set at 6% and 15 kN/m³, respectively. Simple compression strength tests were performed after 7 days of cure. The results indicated that the marble residue is capable of promoting greater resistance to the soil as its content increases when compared to a soil stabilized only with cement. An increase of 30 kPa was observed by adding 30% of residue to the soil-cement mixture. However, the soil stabilized with lime showed better results, having a difference of 400 kPa when compared with the addition of 50% of residue. The costs for stabilization with the three types of chemical stabilizers (cement, cement and residue and lime) were also more favorable for lime.

Keywords: Ornamental rock polishing residue, cement, expansive soil, soil stabilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cimento.	16
Figura 2 - Variação da expansão pelo Teor de mármore (Tm).	19
Figura 3 - Relação UCS com porosidade por teor volumétrico de cimento.....	22
Figura 4 - Fluxograma da pesquisa.....	24
Figura 5 - Fluxograma do programa experimental da pesquisa.	25
Figura 6 - Solo utilizado na pesquisa.	26
Figura 7 - Resíduo de mármore utilizado na pesquisa.....	27
Figura 8 - Escolha dos pontos de umidade e peso específico seco para a pesquisa.	29
Figura 9 - Moldagem do corpo de prova – Compactação.	31
Figura 10 - Corpo de prova após compactação, antes de desmolde.	32
Figura 11 - Corpo de prova desmoldado, etapa de medição e pesagem.....	32
Figura 12 - Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão simples.	33
Figura 13 - Corpo de prova após realização do ensaio.....	34
Figura 14 - Variação de resistência à compressão simples em relação a quantidade de resíduo presente nas amostras.....	37
Figura 15 - Comparativo entre diferentes misturas para estabilização do solo.	38
Figura 16 - Custos para aumentar em 1kPa a resistência do solo.....	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Teor de cimento para o ensaio de compactação.....	20
Quadro 2 - Parâmetros da equação de previsão da resistência à compressão simples para diferentes tipos de solo.	23
Quadro 3 - Variáveis investigadas no programa experimental.....	28
Quadro 4 - Variáveis fixadas no Programa Experimental.....	28
Quadro 5 - Variáveis de ruído no Programa Experimental.	29
Quadro 6 - Ensaio de caracterização do solo.	30
Quadro 7 - Dados dos Corpos de Prova moldados.....	35
Quadro 8 - Dados dos Corpos de Prova moldados sem adição de resíduo.	36
Quadro 9 - Dados obtidos por Tenório (2018) com adição de cal.	37
Quadro 10 - Composição de 1m ³ de solo estabilizado 6% de cimento.	39
Quadro 11 - Composição de 1m ³ de solo estabilizado 6% de cimento e 50% de resíduo de mármore.....	39
Quadro 12 - Composição de 1m ³ de solo estabilizado 6% de cal.	39
Quadro 13 - Valores utilizados na composição de custos.	40
Quadro 14 - Composição de custos para estabilizar 1m ³ de solo com cimento.	40
Quadro 15 - Composição de custos para estabilizar 1m ³ de solo com cimento e resíduo do polimento de mármore.....	40
Quadro 16 - Composição de custos para estabilizar 1m ³ de solo com cal.	40
Quadro 17 - Valores médios de resistência à compressão simples e custo por kPa elevado do solo.	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Objetivos.....	13
1.1.1. Objetivo Geral.....	13
1.1.2. Objetivos específicos.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Solo.....	14
2.1.1. Solo-Cimento.....	14
2.1.2. Solo expansivo.....	15
2.2. Massa específica aparente seca.....	16
2.3. Porosidade.....	17
2.4. Estabilização Solo com Resíduo de rochas ornamentais.....	17
2.5. Dosagem do solo-cimento.....	19
2.5.1. Dosagem a partir da relação vazios/cimento.....	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1. Solo.....	26
3.2. Cimento.....	26
3.3. Água.....	27
3.4. Resíduo de Mármore.....	27
3.5. Definição das Variáveis.....	27
3.5.1. Variáveis Investigadas.....	28
3.5.2. Variáveis Fixadas.....	28
3.5.3. Variáveis de ruído.....	29
3.5.4. Variáveis de resposta.....	30
3.6. Métodos.....	30
3.6.1. Ensaio de caracterização do solo.....	30
3.6.2. Preparação das Misturas, Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova para Ensaio de Compressão Simples.....	31
3.6.3. Ensaio de resistência à compressão simples.....	32
4. RESULTADOS.....	35
4.1. Ensaio de Compressão Simples.....	35
4.2. Comparativo entre diferentes estabilizantes químicos.....	37
4.2.1. Composições de insumos necessários para estabilização de 1m ³ com os diferentes estabilizantes químicos.....	38

4.2.2. Composições de custos para estabilização de 1m ³ com os diferentes estabilizantes químicos na Cidade de Campina Grande.....	39
5. CONCLUSÃO.....	42
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	42
6. REFERÊNCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

O solo é integrante de toda construção, afinal é ele quem dá sustentação a sua carga. Ele também determina características fundamentais do projeto em função de seu perfil e de suas características físicas. Logo, é imprescindível que o mesmo possua resistência adequada para suportar os esforços oriundos da execução e utilização da obra.

Entretanto, a oferta de solos que possuam as características e propriedades procuradas está cada vez mais escassa. Assim, é necessário recorrer ao uso de fundações profundas, empréstimo de material de outra região ou a processos de estabilização, para viabilizar a construção.

A solução do uso de fundações profundas é muito utilizada, contudo, para o caso das estacas cravadas, a presença de construções vizinhas pode influenciar na utilização desse tipo de fundação. Sua execução produz grandes vibrações no solo, podendo gerar danos estruturais às edificações próximas à obra (PEREIRA, 2017). Além disso, as fundações superficiais têm, em geral, custo mais baixo, possuem execução mais rápida e podem ser realizadas com recursos comuns da obra.

A segunda opção para sanar o problema é o empréstimo de solo. Ela é eficaz em grande parte das obras, porém, há casos em que a jazida mais próxima encontra-se distante do canteiro de obras. Sendo assim, torna-se inviável, economicamente, devido ao alto custo do transporte desses materiais.

Solos com baixa capacidade de suporte também podem ter suas características melhoradas *in situ*. Existem diversos métodos para corrigir e estabilizar os solos, e é fundamental conhecê-los para fazer uma escolha correta, tecnicamente e economicamente (BRITO & PARANHOS, 2017).

A estabilização traduz-se no tratamento do solo com o objetivo de aumentar expressivamente sua resistência mecânica. Há diversos métodos para estabilizar um solo, entre os principais tem-se o mecânico, granulométrico e o químico (SARTORI, 2015).

O método mecânico é um processo no qual não se adiciona nenhum material ao solo. Usado para diminuir o volume de vazios do solo, através da aplicação de pressão, impacto ou vibração, melhorando sua resistência mecânica e durabilidade. Resulta-se um solo menos permeável e com maior capacidade de suportar cargas (DOS SANTOS,

2012). O método granulométrico consiste na mistura de dois ou mais solos com o intuito de obter um material com distribuição granulométrica mais contínua. Por fim, o método químico, tem como base adição de estabilizantes químicos, que podem ser usados individualmente ou em conjunto, até que se obtenha resultados desejáveis.

A escolha por utilizar o cimento como estabilizante químico nesta pesquisa justifica-se pela vasta quantidade de estudos (DOS SANTOS (2012), SARTORI (2015), SPECHT (2000), FOPPA (2005), LOPES JUNIOR (2007) e ROSA (2013)) com resultados positivos, sobre o solo-cimento.

Em sua pesquisa sobre solo fino artificialmente cimentado, ROSA (2013) observou que a adição de cimento Portland nos solos para utilização em camadas de base de fundações rasas, liners de proteção ambiental ou proteção contra erosão em barragens de terra entre outros mostra grandes vantagens econômicas, evitando a necessidade de substituição do solo natural bem como, a necessidade de uma área de despejo.

Atrelado ao fator econômico, observa-se que há um aumento significativo na resistência do solo ao ser adicionado cimento em sua composição. O cimento é um material que está trazendo resultados positivos nesse campo de estudo e pode ser utilizado para tratar qualquer tipo de solo (SPECHT, 2000). Porém, Gonçalves (2016) comenta em seu trabalho que esse material não deve ser utilizado para estabilizar solos orgânicos devido sua elevada capacidade de troca de cátions e retenção dos íons de cálcio dificultando a hidratação.

O uso do resíduo do polimento de rochas ornamentais fundamenta-se no crescimento constante da indústria da engenharia civil, ocasionando o aumento da demanda por uso de produtos e matérias primas que geram impactos ambientais na sua extração e manejo. Com isso, as indústrias vêm buscando a utilização de novos materiais que apresentem maior eficiência e proporcionem o reaproveitamento sustentável dos resíduos gerados pelas atividades humanas. (Ângulo et al., 2001).

Brum (2000, *apud* TEIXEIRA E COSTA 2017), comenta que o setor mineral é responsável por diversos impactos ambientais negativos, destacando-se as alterações na paisagem devido à remoção do minério e do material estéril, alterações nos recursos hídricos e emissão de poeira e ruído. Dessa forma, ao utilizar os resíduos industriais, que

anteriormente seriam descartados, gera-se diminuição do impacto ambiental no beneficiamento das rochas ornamentais.

Além de sua utilização ser benéfica ao meio ambiente e economicamente viável, o uso desses resíduos vem trazendo bons resultados para o melhoramento do solo. Chao-Lung, Anh-Tuan, Chun-tsun (2011, *apud* Tenório 2018) afirmam que a cimentação desencadeada pela cal presente no mármore ao reagir com o solo e a água confere a este melhoria em sua resistência. Ademais, devido o mármore ser rico em cálcio, também há possibilidade dele poder combater a expansão de solos.

Nesse contexto, o presente trabalho busca avaliar o comportamento do solo com a incorporação de cimento e resíduo do polimento de rochas ornamentais, no tocante às suas características de resistência a compressão simples.

1.1.Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Estudar o comportamento para uma mistura de solo com resíduo do polimento de pedras ornamentais estabilizado com cimento.

1.1.2. Objetivos específicos

- Aferir a influência do teor de resíduo na resistência à compressão simples do solo expansível estabilizado com cimento;
- Comparar o comportamento da mistura solo expansível-cimento com a mistura solo expansível- cimento- resíduo do polimento de rochas ornamentais e com a mistura solo expansível-cal;
- Verificar qual das soluções estudadas apresenta menor custo para a cidade de Campina Grande – PB, tomando como base o estudo do solo de Paulista – PE;
- Avaliar a possibilidade de uso do resíduo de polimento de rochas ornamentais na estabilização de solos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.Solo

Com exceção dos solos que contêm matéria orgânica em sua composição (solo de cor preta), qualquer tipo de solo pode ser utilizado na composição solo-cimento. Sendo os mais apropriados aqueles que possuem maior teor de areia.

Conforme a aplicação, existem normas específicas que apresentam critérios quanto à seleção do solo a ser utilizado nas misturas de solo-cimento. Em geral o uso para proteção de taludes e pavimentos, faz com que a seleção do solo seja mais rigorosa em virtude da severidade das solicitações nesses casos (FOPPA, 2005).

Assim, devido esta severidade, a NBR 12253/2010, que trata sobre a dosagem do solo-cimento para emprego como camada de pavimento, exige que o solo se enquadre nas classificações A1, A2, A3 ou A4 (ASTM D 3282 – Classification of Soils and Soil-aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes), que contenha 100% de material passando na peneira de abertura de 76 mm e, no máximo, 45% de material retido na peneira de 4,8 mm (FOPPA, 2005).

2.1.1. Solo-Cimento

O solo-cimento é um material obtido através da mistura homogênea de solo, cimento e água, em proporções adequadas e que, após compactação e cura úmida, resulta num produto com características de durabilidade e resistências mecânicas definidas. O seu uso no Brasil vem, desde 1948 (FERREIRA FILHO, 2014).

Ao incorporar o cimento ao solo, tem-se observado um aumento significativo na sua resistência e rigidez quando comparado com as características e propriedades do solo natural. FOPPA (2005), em seu trabalho, observou que mesmo pequenas adições de cimento são suficientes para gerar enormes ganhos de resistência. Ao se aumentar a quantidade de cimento de 1% para 7%, a resistência à compressão simples, em média, quintuplicou. LOPES JUNIOR (2007), ao realizar um estudo sobre a adição de cimento ao solo, fez observações semelhantes. Ele encontrou que a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cimento. E, por esse motivo, o solo estabilizado com esse material tem grande potencial para ser utilizado em fundações superficiais, proteção de taludes, barragens e como base e sub-base de

pavimentos flexíveis (SPECHT, 2000). Por outro lado, o cimento, sendo empregado com uma dosagem incorreta, traz um efeito reverso: as fissuras. Isso ocorre devido ao efeito de retração que é característico desse material, podendo ser minimizado respeitando-se o tempo de cura e a quantidade de água correta que deve ser incorporada à mistura água/cimento (MEHTA E MONTEIRO, 2014). Atrelado a isso, ao comparar os componentes da composição solo-cimento, o cimento apresenta um custo mais elevado, tornando-se indispensável o estudo da correta quantidade do mesmo que se deve acrescentar para que atenda aos critérios de utilização.

Em suma, o estudo da estabilização do solo com cimento está em destaque devido seus resultados positivos e por ser um material que pode tratar a maioria dos solos. Na Universidade Federal de Campina Grande estão sendo iniciados estudos (BRAZ (2018) e TENÓRIO (2018)) referentes a este assunto, e tem-se obtido respostas positivas até então. Braz (2018) analisou em sua pesquisa um solo expansivo proveniente da cidade de Paulista-PE, e demonstrou que valores maiores de resistência são encontrados em solos que obtiveram maior compactação ou maior teor de cimento. A escolha entre as duas opções dependerá apenas de questões econômicas e do prazo de entrega da obra.

2.1.2. Solo expansivo

Segundo Paiva *et al.* (2016), os tipos de solo sujeitos ao fenômeno da expansão são variados. Destacando-se os oriundos de rochas ígneas (basaltos, diabásicos e gabro), como também os provindos de rochas sedimentares (folhelhos, margas e calcários).

A expansividade de um solo é principalmente definida pelo tipo de mineral argílico presente na fração argila, pois nem todos os minerais argilosos apresentam modificações volumétricas com a variação da umidade. A instabilidade pode ser encontrada nas argilas vermiculita e esmectitas, especialmente a montmorilonita (VILAÇA *et al.*, 2008).

O mecanismo de expansão dos argilominerais está relacionado a superfície eletricamente carregada com cargas negativas das partículas. Por estarem negativamente carregadas as partículas adsorvem cátions presentes nos fluidos e moléculas de água orientadas para obter o equilíbrio. Como consequência, ocorre uma mudança de carga na superfície da argila fazendo com que ocorra um fenômeno chamado de *diffuse double layer*. Na ocorrência desse fenômeno há o aumento da distância entre os minerais que

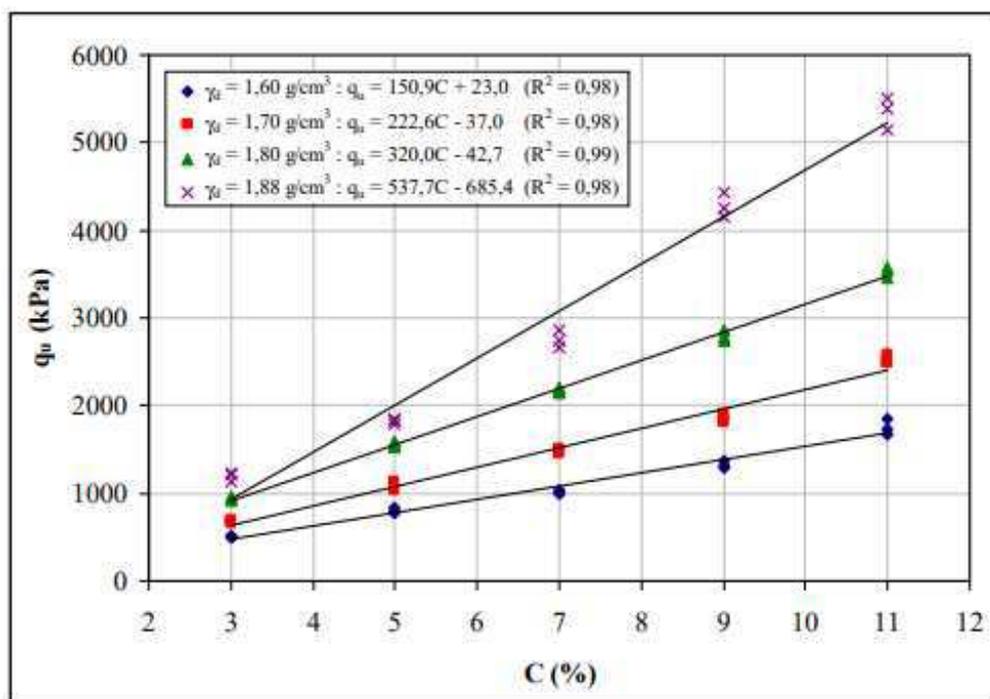
constituem as argilas. Assim sendo, o aumento da distância entre os minerais, ocasiona a expansão do solo (IKEAGWUANI E NWONU, 2019).

2.2. Massa específica aparente seca

No trabalho desenvolvido por LOPES JUNIOR (2007), o autor compara solos com adição de diferentes teores de cimento. Observou-se que o cimento promove elevação na resistência do material. Porém, o ganho de resistência elevou-se com o aumento da massa específico aparente seca do solo compactado, como é possível observar na figura 1. Esse resultado demonstra que a efetividade da cimentação é maior nas misturas com maior grau de compactação.

O ganho de resistência do solo-cimento no aumento da massa específica aparente também foi observado no trabalho de FOPPA (2005). Explica-se esse fato devido a existência de um número maior de contatos entre as partículas e, conseqüentemente, há uma maior possibilidade do cimento promover a união das partículas nesses contatos.

Figura 1 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cimento.



Fonte: LOPES JUNIOR (2007).

2.3.Porosidade

Assim como a massa específica aparente seca, a porosidade do solo também é um fator determinístico para sua resistência. Segundo LOPES JUNIOR (2007) de maneira similar à quantidade de cimento, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência a compressão simples do solo-cimento. Assim sendo, a q_u (Resistência à compressão simples) cresce exponencialmente com a redução da porosidade da mistura solo-aglomerante.

O ganho de resistência com a redução na porosidade do solo-cimento explica-se pela cimentação mais efetiva, em função do maior número de contatos entre partículas existentes. Além deste aspecto, a maior capacidade de distribuição de tensões no interior da amostra bem como a maior capacidade mobilização de atrito nas porosidades mais baixas também contribuem para o ganho de resistência do material (FOPPA, 2005).

2.4.Estabilização Solo com Resíduo de rochas ornamentais

Adicionalmente ao cimento, este trabalho visa estudar a estabilização do solo com resíduo do polimento de rochas ornamentais. Esta alternativa de estabilizante se torna relevante devido à redução do impacto ambiental causado pela produção desses rejeitos finos, durante o beneficiamento da matéria prima, que ficariam estocados sem uso.

MENDES (1999 *apud* BATALIONE, 2007), identifica os tipos de impactos ambientais associados à exploração de pedreiras devido à geração de finos:

- Poluição atmosférica através de emissão de materiais particulados presentes nos depósitos;
- Alterações no regime hidrológico promovendo turvamento, assoreamento e mudanças nas seções das calhas dos cursos de água; trazendo consequências praticamente irreversíveis à manutenção de um micro-sistema biológico, danificando o habitat das espécies que dependem deste meio;
- Ocupações indevidas de áreas devido à necessidade de estocagem de rejeitos gerados. Muitas vezes, estas estocagens, tendem a esterilizar terrenos que poderiam servir a utilizações mais nobres ou até mesmo promover poluição do solo;

- Consumo excessivo de água para processar os agregados com perda em certos casos, de aproximadamente 80% do volume de água utilizado no processo.

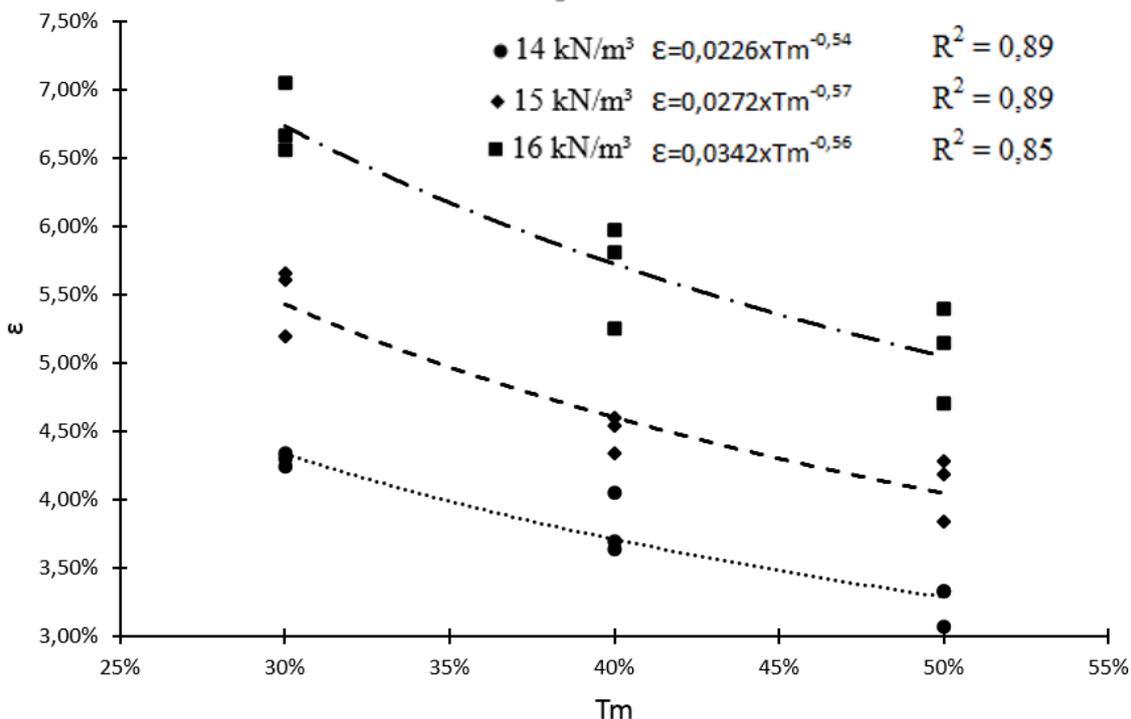
Atrelado ao fato de que, ao ser utilizado o pó do beneficiamento de rochas ornamentais na estabilização de solos, haveria uma redução no impacto ambiental, tem-se também beneficiamento econômico. Pois, aumentaria a eficiência do sistema produtivo industrial, utilizando como matéria-prima um material que anteriormente não teria finalidade.

Os benefícios do emprego dos resíduos da produção de pedras ornamentais para melhoria do solo são comprovados no trabalho de Angelim, Angelim E Carasek (2003). Esses autores verificaram em sua pesquisa que a utilização desses materiais alternativos aumentou a coesão interna do solo, além disso, houve aumento da resistência mecânica e da resistência ao desgaste por abrasão.

De acordo com SILVANI (2010), que utilizou o resíduo de ágata e ametistas em pó para melhorar as características de um solo, a utilização desse resíduo garante um acréscimo de resistência ao solo até um percentual de 75% de adição, além de diminuir o impacto de um problema regional.

No trabalho de TENÓRIO (2018) foi utilizado o resíduo de polimento de rochas ornamentais para o tratamento de um solo. Por meio dos ensaios de expansão em uma dimensão, ele observou que este material é capaz de conter a expansão do solo. O resíduo de mármore teve um comportamento inerte, logo a redução da expansão do solo não foi causada por reações químicas. A redução deu-se devido a substituição do material expansivo por um material inerte. O resultado obtido por ele é observado na Figura 2.

Figura 2 - Variação da expansão pelo Teor de mármore (Tm).



Fonte: Tenório (2018)

Ademais, o uso desses resíduos proporciona a redução de custo, contribuindo positivamente não somente no quesito ambiental, mas também econômico.

2.5. Dosagem do solo-cimento

A Associação Brasileira de Cimento Portland (2002) apresenta um estudo técnico que contém a descrição das normas de dosagem de solo-cimento propostas pela Portland Cement Association (PCA), dos Estados Unidos da América, desenvolvidas entre 1932 e 1952. Segundo o estudo, os resultados têm comprovação em serviços executados com solos de origens variadas de diferentes regiões do mundo. As normas de dosagem estão divididas em “Geral”, aplicável a qualquer tipo de solo (com exceção dos orgânicos), e “Simplificada”, para solos de textura predominantemente granular.

Este estudo procura determinar o teor de cimento capaz de garantir à mistura a permanência de suas características melhoradas que poderiam sofrer alteração, após um período, devido a ação de cargas e as variações climáticas. Assim sendo, foram idealizados os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem (e por congelamento e

degelo, na versão original da norma) que melhor simulariam as tensões internas geradas na ocorrência de variações de umidade no interior da mistura de solo-cimento em serviço.

A escolha do teor de cimento adequado para a realização do ensaio é feita a partir de solos anteriormente ensaiados que possuam características semelhantes ao solo que está sendo estudado. Deve-se considerar a granulometria, coloração, região de origem, profundidade da amostra, origem geológica e índices de consistência. Entretanto, há solos para os quais não se tem algum comparativo. Nesses casos a Norma Geral de dosagem de Solo-cimento fornece um quadro (Quadro 1), elaborado pela PCA, que indica o teor a ser adotado no ensaio de compactação.

Quadro 1 - Teor de cimento para o ensaio de compactação.

Classificação do solo segundo a AASHTO (M 145)	Teor de cimento em massa (%)
A1-a	5
A1-b	6
A2	7
A3	9
A4	10
A5	10
A6	12
A7	13

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002

Por outro lado, para CASANOVA (1992) países subdesenvolvidos, assolados por graves problemas sociais e com escassez de capital, devem procurar e desenvolver o método de dosagem físico-químico. Este método foi originalmente proposto pela Central Road Research Institute of Índia, e é uma alternativa ao método proposto pela ABCP para rápida quantificação da interação solo-cimento. O método apresenta a vantagem de considerar a interação elétrica entre as partículas de argila e as de cimento. Da comparação dos resultados obtidos no método simplificado com aqueles obtidos a partir do método de dosagem da ABCP, verifica-se razoável concordância entre ambos,

indicando ser este método bastante útil na dosagem de cimento para solos-cimento (CERATTI & CASANOVA, 1988).

2.5.1. Dosagem a partir da relação vazios/cimento

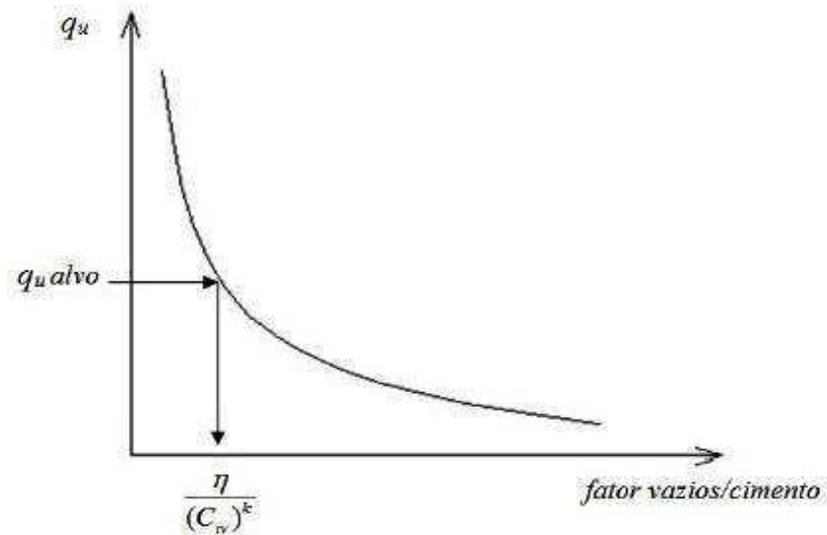
Os estudos feitos por LOPES JUNIOR (2007) mostraram que, para o solo com adição de cal não saturados (estado em que normalmente se encontram os aterros compactados), a relação água/aglomerante não é um bom parâmetro para estimativa da resistência à compressão simples. O parâmetro que se mostrou mais adequado para essa estimativa foi a relação vazios/aglomerante (razão entre a porosidade e o teor volumétrico do aglomerante), ajustado por um expoente.

Helene & Terzian (1993 *apud* FOPPA, 2005) explicam que como a compactação em solos ou solo-cimento nunca consegue expulsar completamente o ar do sistema solo-água-ar ou solo-cimento-água-ar, a resistência não pode ser correlacionada com a relação água/cimento, pois esta só se aplica a materiais onde o ar foi totalmente expulso e os vazios existentes estão preenchidos por água. Esse é o caso do concreto, apesar de na prática, ser considerada a existência de aproximadamente 1,5% do volume total composto por vazios preenchidos por ar.

Foppa (2005 *apud* BRAZ 2018) idealizou um trabalho que visou estudar sobre as variáveis que mais influenciam na resistência mecânica de solos artificialmente cimentados, no qual ele apresenta um método de dosagem racional similar ao existente para o concreto. Nesse estudo a variável $\frac{\eta}{(C_{iv})^k}$, onde η é a porosidade da mistura comparadas e $(C_{iv})^k$ é o teor de cimento volumétrico ajustado por um expoente, possui papel fundamental para o solo comparado com 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 3.

Figura 3 - 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 e 2, como regra geral:

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

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

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 o Quadro 2.

Quadro 2 - 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	17,2; 18,0; 18,8	5,95E+05	2,21	0,55
FOPPA (2005)	Areia Fina Siltosa	1; 2; 3; 5; 7; 9 ;12	26,4; 28,8; 31,7; 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: Braz (2018)

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.

3. 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 dessa pesquisa foi dividido em três etapas como mostra a Figura 4. A Figura 5 mostra como foi dividido o programa experimental adotado para esse trabalho.

Figura 4 - Fluxograma da pesquisa.

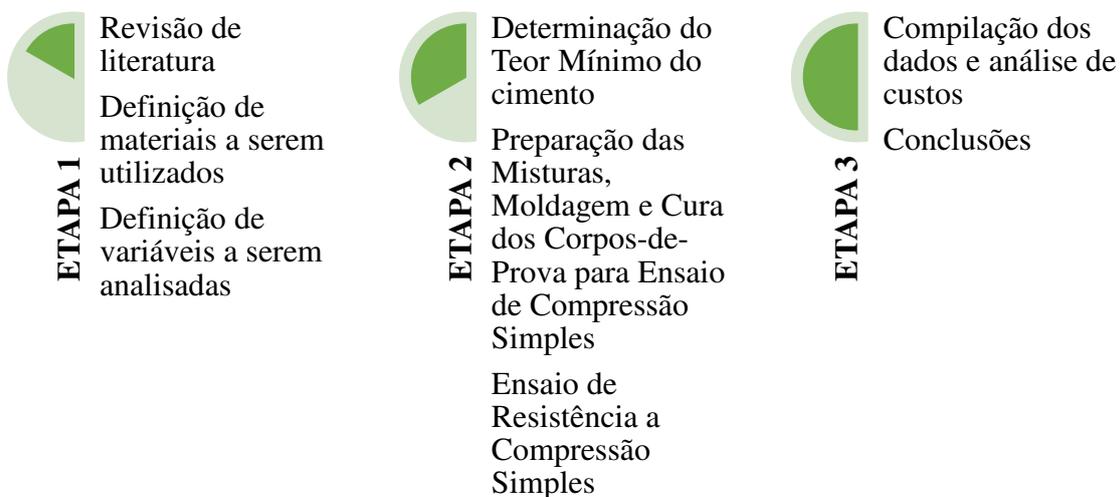
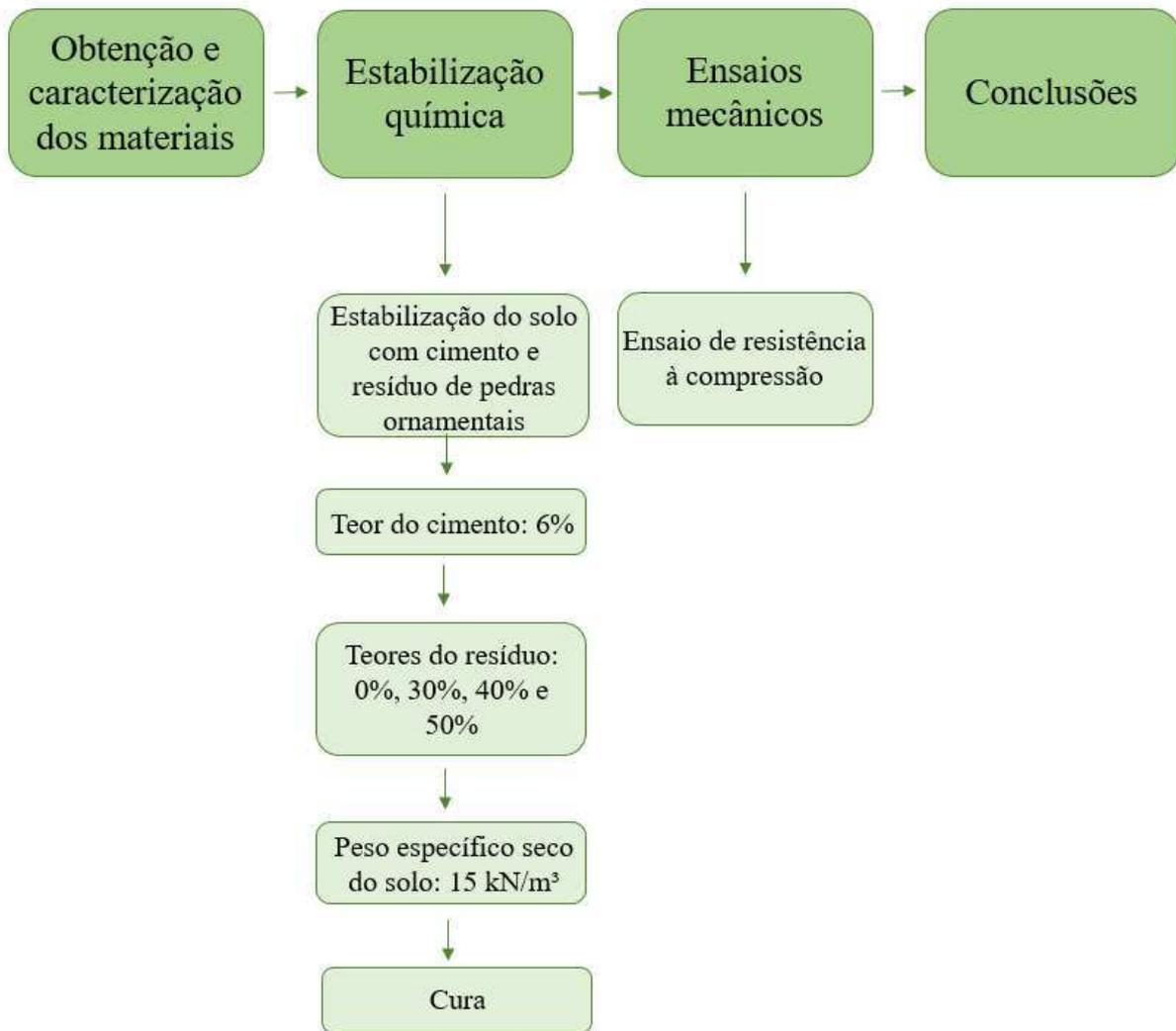


Figura 5 - Fluxograma do programa experimental da pesquisa.



3.1. Solo

O solo utilizado na pesquisa (Figura 6) 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 6 - Solo utilizado na pesquisa.



3.2. Cimento

Para a pesquisa foi utilizado o cimento Portland, cuja classificação é 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 adquire 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) (BRAZ, 2018).

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.

3.3. Água

Segundo Mendes *et al.* (2011) a água é um reagente utilizado na maioria dos testes laboratoriais e por isso deve seguir um padrão de controle de qualidade rigoroso. O fornecimento urbano de água apresenta moléculas orgânicas, íons inorgânicos, partículas, coloides, gases, bactérias e seus produtos, que podem alterar os resultados dos exames laboratoriais e causar eventuais erros e falhas mecânicas em equipamentos analíticos. Assim sendo, foi escolhido utilizar na realização da presente pesquisa a água destilada.

3.4. Resíduo de Mármore

O resíduo de mármore foi coletado na marmoraria Mármore Campinense Localizada na cidade de Campina Grande-PB. A marmoraria dedica-se ao beneficiamento de rochas ornamentais como mármore e granitos. A Figura 7 apresenta o resíduo de polimento de rochas ornamentais utilizado neste trabalho.

Figura 7 - Resíduo de mármore utilizado na pesquisa.



3.5. Definição das Variáveis

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

3.5.1. Variáveis Investigadas

As variáveis que terão seus níveis variados a fim de encontrar respostas sobre sua participação nas reações da mistura estão listadas no Quadro 3. Sua escolha foi feita baseada na pesquisa de BRAZ (2018) pois a pesquisa busca fazer um comparativo com os resultados obtidos nos dois estudos.

Quadro 3 - Variáveis investigadas no programa experimental.

Variável	Unidades de medição	Níveis adotados
Teor de resíduo de mármore	%	30; 40; 50

3.5.2. Variáveis Fixadas

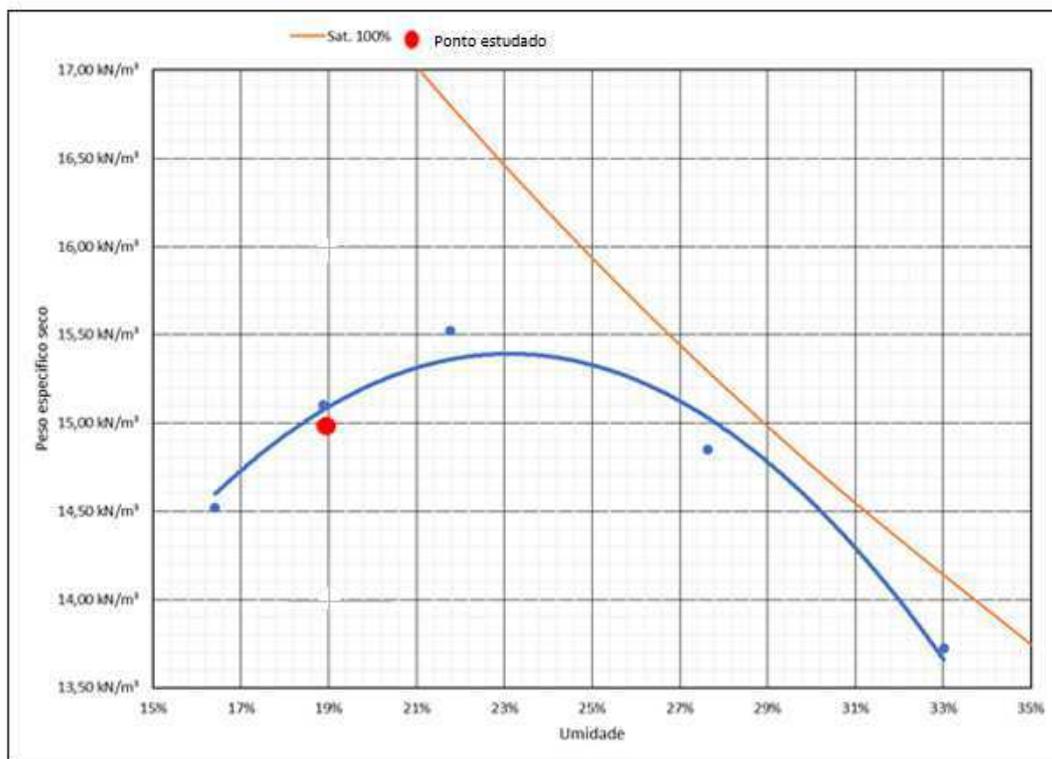
As variáveis do Quadro 4 serão mantidas fixas ao longo de todo o experimento.

Quadro 4 - Variáveis fixadas no Programa Experimental.

Variável	Unidades de medida	Nível adotado
Tipo de solo	-	Solo Expansivo proveniente da região de Paulista – PE
Teor de cimento	%	6;
Teor de umidade	%	19;
Peso específico seco	kN/m ³	15;

Como esta pesquisa faz parte de um trabalho maior, o teor de cimento foi escolhido com base no teor médio estudado por Braz (2018). O peso específico seco (γ_d) e a umidade foram escolhidos da mesma forma, como é mostrado na figura 8.

Figura 8 - Escolha dos pontos de umidade e peso específico seco para a pesquisa.



Fonte: Braz (2018)

3.5.3. 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. O Quadro 5 identifica as variáveis de ruído consideradas e suas medidas de controle.

Quadro 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

3.5.4. Variáveis de resposta

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

3.6. Métodos

Analizou-se para essa pesquisa o comportamento do solo ensaiado com adições de 30%, 40% e 50% de resíduo de mármore e fixou-se em todos os Corpos de Prova 6% de Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI).

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 para verificação da resistência mecânica.

3.6.1. Ensaios de caracterização do solo

Os ensaios aos quais o solo foi submetido para caracterização fizeram parte do programa de pesquisa de Tenório (2018). O Quadro 6 informa quais ensaios foram feitos e seus resultados.

Quadro 6 - Ensaios de caracterização do solo.

Ensaio	Resultado	Norma
Granulometria por peneiramento e sedimentação	Solo siltoso arenoso	NBR 7181 (ABNT, 2018)
Limite de Liquidez (LL)	49%	NBR 6459 (ABNT, 2016)
Limite de Plasticidade (LP)	21%	NBR 7180 (ABNT, 2016)
Compactação Proctor	Umidade ótima: 23% Densidade seca máxima: 15,4 kN/m ³	NBR 7182 (ABNT, 2016)

Fonte: Tenório (2018)

3.6.2. 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 7 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. As Figuras de 9 a 11 mostram a moldagem do corpo de prova, a moldagem finalizada e o corpo de prova desmoldado, respectivamente.

Figura 9 - Moldagem do corpo de prova – Compactação.



Figura 10 - Corpo de prova após compactação, antes de desmolde.



Figura 11 - Corpo de prova desmoldado, etapa de medição e pesagem.



3.6.3. 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 6 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. As Figuras 12 e 13 mostram a prensa utilizada para realizar o ensaio e o corpo de prova rompido, respectivamente.

Figura 12 - Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão simples.



Figura 13 - Corpo de prova após realização do ensaio.



4. RESULTADOS

4.1. Ensaio de Compressão Simples

A Quadro 7 mostra os dados dos corpos de prova ensaiados à compressão simples com massa específica e teor de cimento fixos de 15 kN/m³ e 6%, respectivamente. Os corpos de prova de número 7 e 9 não puderam ser ensaiados, pois apresentaram problemas estruturais. O Quadro 8 expõe os dados dos corpos de prova moldados por Braz (2018) que serão utilizados nessa pesquisa. O uso desses dados é explicado pela necessidade de haver dados de resistência à compressão simples do solo sem adição de resíduo de polimento de mármore, apenas com adição de 6% de cimento para a comparação. Como em seu estudo Braz (2018) utilizou o mesmo solo empregado nesta pesquisa, foi possível unir seus resultados com os obtidos neste estudo. Os CPs 1 e 6 do Quadro 7 e o CP 18 do Quadro 8 foram desconsiderados por terem valores de resistência à compressão simples muito distintos quando comparados com os valores dos demais corpos de prova.

Quadro 7 - Dados dos Corpos de Prova moldados.

Nº do CP	Teor de cimento	Teor de resíduo	Teor de Umidade	Massa Específica Aparente Seca (kN/m ³)	q _u (kPa)	q _u médio (kPa)
1	6%	30%	18,24%	15,0	345,56	260,70
2	6%	30%	18,14%	15,0	291,88	
3	6%	30%	18,45%	15,0	229,51	
4	6%	40%	17,82%	15,0	298,49	280,88
5	6%	40%	17,13%	15,0	263,28	
6	6%	40%	17,06%	15,0	180,35	
7	6%	50%	18,70%	15,0	-	371,38
8	6%	50%	18,98%	15,0	371,38	
9	6%	50%	18,29%	15,0	-	

Quadro 8 - Dados dos Corpos de Prova moldados sem adição de resíduo.

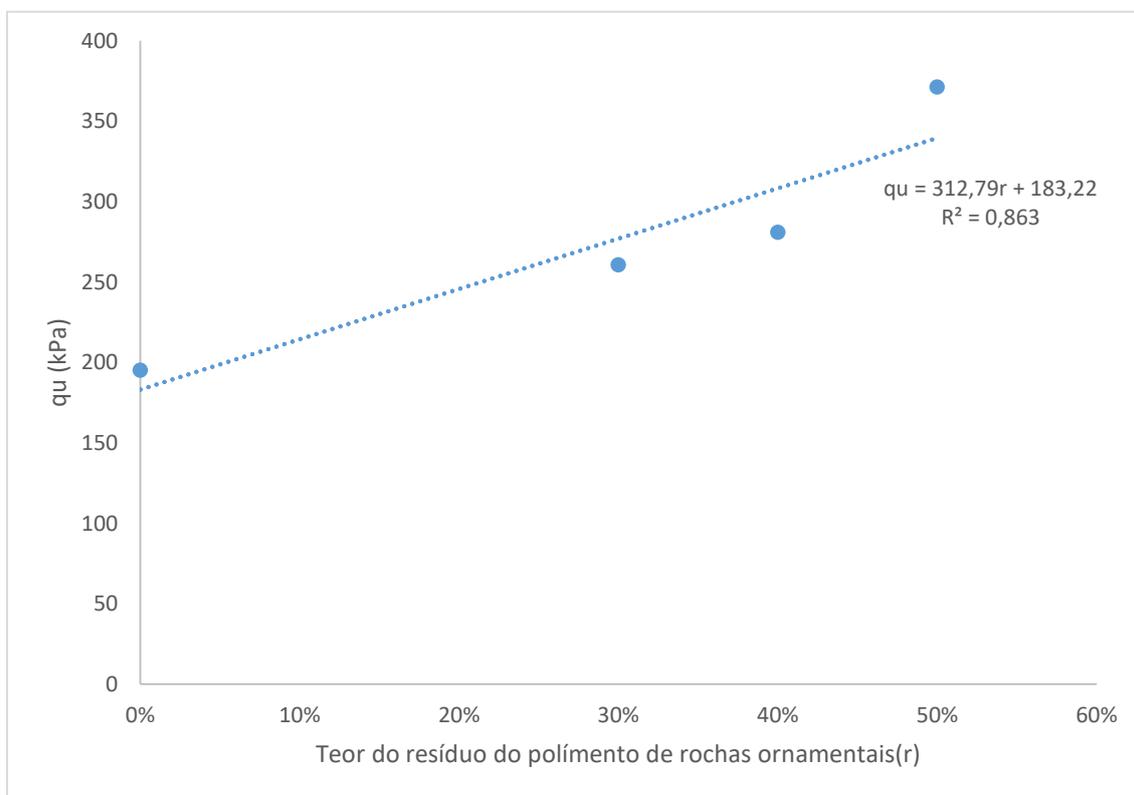
Nº do CP	Teor de cimento	Teor de resíduo	Teor de Umidade	Massa Específica Aparente Seca (kN/m³)	q_u (kPa)	q_u médio (kPa)
17	6%	0%	11,02%	15,0	205,58	195,25
18	6%	0%	16,09%	15,0	403,35	
19	6%	0%	16,09%	15,0	184,92	

Fonte: Braz (2018)

A Figura 14 foi elaborada com os valores médios fornecidos nos Quadros 7 e 8. Nela pode ser observada a variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do teor de resíduo do polimento de rochas ornamentais (r) em cada CP.

Avaliando a Figura 14, podemos perceber que os corpos de prova, curados por 7 dias, possuem um acréscimo em sua resistência à compressão simples com a adição do resíduo do polimento de rochas ornamentais. O valor de q_u aumenta linearmente com acréscimo do teor de resíduo.

Figura 14 - Variação de resistência à compressão simples em relação a quantidade de resíduo presente nas amostras.



4.2. Comparativo entre diferentes estabilizantes químicos

O Quadro 9 expõe os resultados obtidos por Tenório (2018) ao avaliar a resistência à compressão simples do solo estabilizando-o com 6% de cal.

Quadro 9 - Dados obtidos por Tenório (2018) com adição de cal.

Nº do CP	Teor de cal	Teor de resíduo	Teor de Umidade	Massa Específica Aparente Seca (kN/m³)	qu (kPa)	qu médio (kPa)
23	6%	0%	18,60%	15,1	873,82	832,04
24	6%	0%	18,60%	15,2	778,13	
25	6%	0%	18,60%	15,1	844,18	

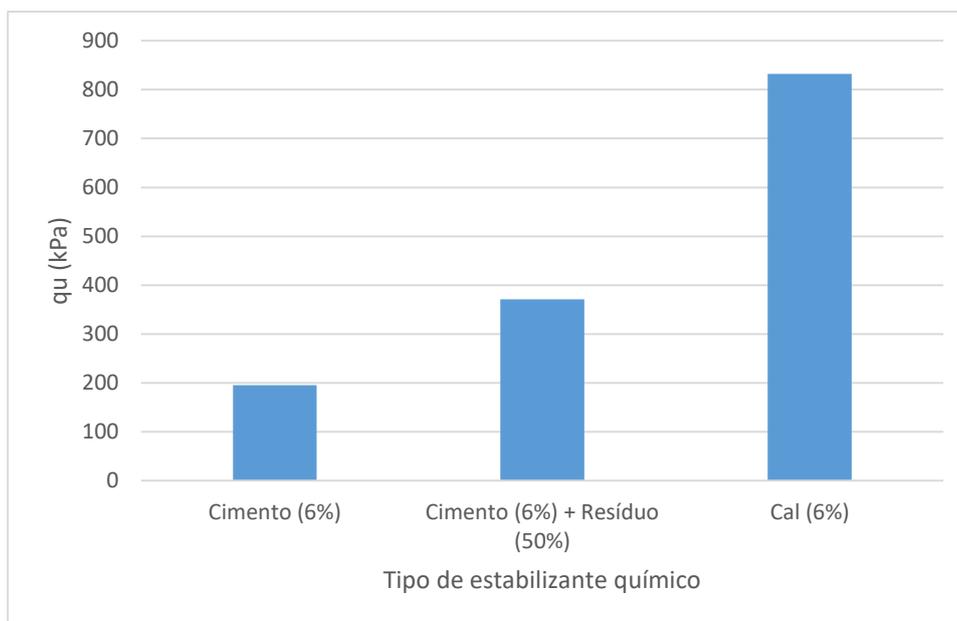
Fonte: Tenório (2018)

A Figura 15 expõe um comparativo entre os resultados médios da resistência à compressão simples dos corpos de prova ensaiados nesta pesquisa juntamente com os ensaiados por Tenório (2018) e Braz (2018). O valor médio utilizado da mistura solo-cimento-resíduo foi calculado a partir dos resultados obtidos nos CPs com 50% de resíduo, pois foi a mistura que obteve melhor resultado. Na Figura 15 ainda é possível

perceber que a adição do resíduo do polimento de mármore à mistura solo-cimento traz melhoras aos resultados de q_u .

Adicionalmente, ao compararmos os valores obtidos nesta pesquisa com aqueles obtidos ao adicionar 6% de cal ao solo na pesquisa de Tenório (2018) temos uma clara diferença entre os valores. A maior resistência à compressão simples alcançada pela adição de cal deve-se a característica expansiva do solo. Dentre os elementos estudados (cal, cimento e resíduo de polimento de rochas ornamentais) a cal é a única capaz de resolver quimicamente o problema da expansividade do solo, através das trocas catiônicas.

Figura 15 - Comparativo entre diferentes misturas para estabilização do solo.



4.2.1. Composições de insumos necessários para estabilização de 1m^3 com os diferentes estabilizantes químicos

Os Quadros 10 a 12 mostram as composições das quantidades das misturas solo-cimento, solo-cimento-resíduo do polimento do mármore e solo-cal para estabilizar 1m^3 de solo respectivamente. Os valores de cimento e da cal foram fixados em 6% por este ser o teor de cimento utilizado nessa pesquisa e o teor de resíduo de mármore escolhido foi de 50% por ter apresentado valores mais altos de resistência à compressão simples.

Quadro 10 - Composição de 1m³ de solo estabilizado 6% de cimento.

Composição do solo + Cimento				
γ_d (kN/m³)	Teor de Cimento (%)	m (Kg)	Cimento (Kg)	Solo (Kg)
15,0	6	1500,00	90,00	1410,00

Quadro 11 - Composição de 1m³ de solo estabilizado 6% de cimento e 50% de resíduo de mármore.

Composição do solo + Cimento + Resíduo de mármore							
γ_d (kN/m³)	Teor de Cimento (%)	Teor de mármore (%)	m (Kg)	Cimento (Kg)	Solo+Resíduo (Kg)	Resíduo de Mármore (Kg)	Solo (Kg)
15,0	6,0	50,0	1500,0	90,0	1410,0	705,0	705,0

Quadro 12 - Composição de 1m³ de solo estabilizado 6% de cal.

Composição do solo + Cal				
γ_d (kN/m³)	Teor de Cal (%)	m (Kg)	Cal (Kg)	Solo (Kg)
15,0	6	1500,00	90,00	1410,00

4.2.2. Composições de custos para estabilização de 1m³ com os diferentes estabilizantes químicos na Cidade de Campina Grande

A partir desses valores, foi feita a composição de custos para a estabilização do solo com cada uma das misturas. O Quadro 13 mostra os valores de cimento, cal e resíduo de mármore que foram utilizados para compor os custos. Os preços foram obtidos no comércio local para serem representativos da cidade. Não há custo referente ao resíduo do beneficiamento do mármore, pois em Campina Grande-PB esse material é cedido por empresas que realizam esse procedimento. Os Quadros 14 a 16 mostram o resultado obtido.

Quadro 13 - Valores utilizados na composição de custos.

Material	Especificação	Valor (R\$)
Cimento	Nacional – CPV-ARI 40Kg	21,00
Cal hidratada	Itaú 20Kg	10,49
Resíduo de rochas ornamentais	Beneficiamento do mármore	0,00

Quadro 14 - Composição de custos para estabilizar 1m³ de solo com cimento.

1m³ de solo estabilizado ($\gamma_d = 15,0 \text{ kN/m}^3$) com 6% de Cimento				
Material	Consumo	Unidade	Custo Unitário	Subtotal
Solo	1410,00	Kg	R\$0,00	R\$0,00
Cimento	90,00	Kg	R\$0,53	R\$47,70
TOTAL				R\$47,70

Quadro 15 - Composição de custos para estabilizar 1m³ de solo com cimento e resíduo do polimento de mármore.

1m³ de solo estabilizado ($\gamma_d = 15,0 \text{ kN/m}^3$) com 6% de Cimento + 50% de Resíduo de mármore				
Material	Consumo	Unidade	Custo Unitário	Subtotal
Solo	705,00	Kg	R\$0,00	R\$0,00
Cimento	90,00	Kg	R\$0,53	R\$47,70
Resíduo de mármore	705,00	Kg	R\$0,00	R\$0,00
TOTAL				R\$47,70

Quadro 16 - Composição de custos para estabilizar 1m³ de solo com cal.

1m³ de solo estabilizado ($\gamma_d = 15,0 \text{ kN/m}^3$) com 6% de Cal				
Material	Consumo	Unidade	Custo Unitário	Subtotal
Solo	1410,00	Kg	R\$0,00	R\$0,00
Cal	90,00	Kg	R\$0,53	R\$47,21
TOTAL				R\$47,70

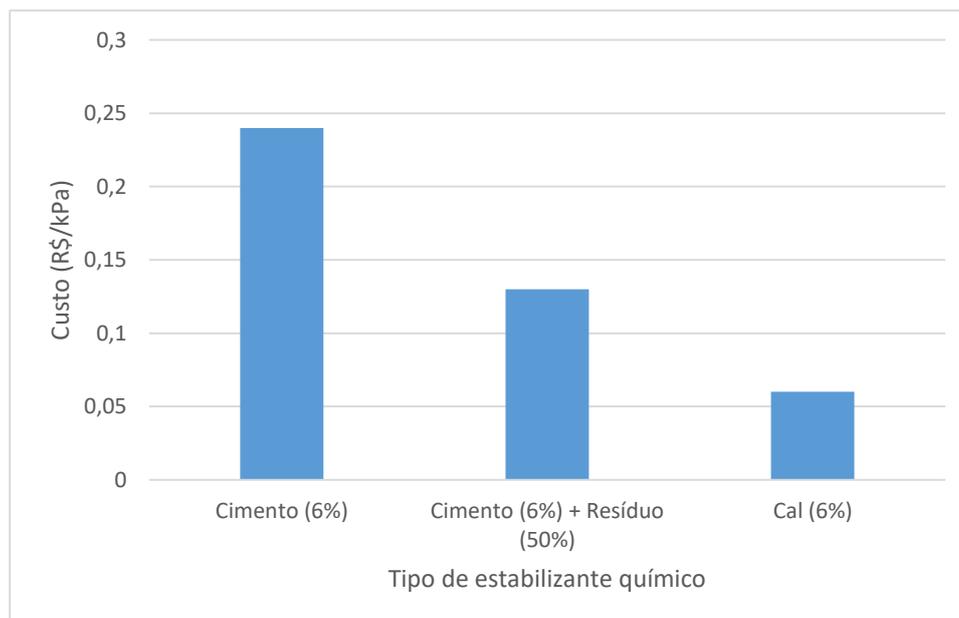
A Figura 17 mostra os valores para aumentar em 1kPa a resistência de 1m³ de solo para cada um dos custos apresentados anteriormente. Foi feita uma média dos valores

de resistência à compressão simples apresentados nos tópicos 4.1 e 4.1.2 para cada tipo de estabilizante químico. O Quadro 17 expõe os valores utilizados na Figura 16.

Quadro 17 - Valores médios de resistência à compressão simples e custo por kPa elevado do solo.

Tipo de estabilizante químico	Resistência à compressão simples (kPa)	Valor para melhorar 1m³ de solo (R\$)	Custo para elevar 1 kPa (R\$/kPa)
Cimento	195,25	47,70	0,24
Cimento + Resíduo	371,38	47,70	0,13
Cal	832,04	47,70	0,06

Figura 16 - Custos para aumentar em 1kPa a resistência do solo.



Observa-se que o custo para estabilizar o solo com as três misturas é o mesmo, já que o resíduo do polimento de rochas ornamentais é cedido por empresas que beneficiam esse tipo de material. Porém, o custo para elevar 1 kPa torna-se mais atrativo para a cal. Chegando à valores de resistência à compressão simples duplamente maiores e tendo custo de metade daqueles obtidos com os dois outros estabilizantes químicos.

5. CONCLUSÃO

Unindo o estudo teórico e os resultados obtidos na prática acerca da influência do teor do resíduo na resistência à compressão simples do solo expansível estabilizado com cimento, chegou-se à conclusão de que a adição do resíduo provoca melhores resultados de resistência ao passo que aumentamos seu teor.

Ao comparar a mistura solo-cimento com a mistura solo-cimento-resíduo, observa-se que os valores encontrados são semelhantes. Entretanto, o acréscimo do resíduo à mistura traz resultados um pouco melhores. A comparação foi feita a partir dos resultados obtidos por Braz (2018) para melhoramento do solo com 6% de cimento e massa específica aparente seca (γ_d) de 15 kN/m³. Porém, se comparado com os valores de Tenório (2018) de estabilização do solo com a cal tem-se resultados melhores que aqueles com cimento e resíduo devido a cal estabilizar a expansão do solo.

Ademais, os custos envolvendo a estabilização com os três tipos de estabilizantes químicos (cimento, cimento e resíduo e cal) foi semelhante, ao se tratar da cidade de Campina grande onde é possível obter o resíduo por doações das empresas. Entretanto, o custo por kPa é menor para estabilização com cal.

Por fim, o uso do resíduo de polimento de rochas ornamentais mostrou-se positivo no tocante ao aumento da resistência à compressão simples. Dessa forma, a escolha por utilizar esse material será da preferência do construtor e de sua disponibilidade na cidade onde está situada a obra.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Estudar a influência do teor de resíduo do polimento de rochas ornamentais com teores de cimento maiores que 6% na resistência do solo;
- Analisar a resistência de um solo com diferentes valores de compactação ao adicionar-se o resíduo do polimento de rochas ornamentais;
- Estudar o comportamento de um solo estabilizado com cal e resíduo de polimento de rochas ornamentais.

6. REFERÊNCIAS

ANGELIM, R. R.; ANGELIM, S. C. M.; CARASEK, H. **Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos nas propriedades das argamassas e dos revestimentos.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 5. 2003, São Paulo. São Paulo: ANTAC, 2003.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M.. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland.** 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.

ASTM D3282: **Classification of Soils and Soil-aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.**

BATALIONE, Giovane. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica.** 2007. 172 p. Dissertação (Mestre em Geotecnia)- Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

BITTENCOURT, Caio. **Análise de Solo : O Que a Torna Indispensável para a Construção Civil?.** 2018. Disponível em: <<https://www.xistojunior.com/single-post/Analise-de-Solo-para-a-Construcao>>. Acesso em: 15 nov. 2018.

BRAZ, R. I. F. **Avaliação da resistência de um solo expansivo do município de Paulista-PE melhorado com cimento Portland.** 2018. Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. **Estabilização de Solos.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, Setembro de 2017.

CERATTI, J. A. P.; CASANOVA, F. J. **Um método físico químico para dosagem de solocimento.** In: Simpósio sobre novos conceitos em ensaios de campo e laboratório em geotecnia, 1988, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: COPPE/ABMS/ABGE, 1988, 2v, v.1, p.191-200.

CROFT, J. B. **The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization**. Géotechnique, London, v.17, p.119-135, 1967.

DOS SANTOS, Monique Nascimento. **Análise do efeito da estabilização mecânica em matrizes de terra**. 2012. 30 p. Relatório de Iniciação Científica – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

FERREIRA FILHO, Efren de Moura. **Construção com solo cimento** . 2014. Disponível em: <<http://www.obra24horas.com.br/artigos/concreto/construcao-com-solo-cimento>>. Acesso em: 19 out. 2018.

FOPPA, Diego. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 144 p. Dissertação (Mestre em Engenharia)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GONÇALVES, J. C. P. da S. **Estudo do teor em água e porosidade**. 2016. Universidade de Lisboa, 2016.

GOULARTE, Cristina Lemos; PEDREIRA, Celso Luis da Silva. **Estabilização química de solo com adição de cimento ou cal como alternativa de pavimento**. 2009. 7 p. Artigo (Bacharelado em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2009.

IKEAGWUANI, C. C.; NWONU, D. C. **Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p. 37, 2019.

LARNACH, W. J. **Relationship between dry density, voids/cement ratio and strength of soil-cement mixtures**. Civil Engineering and Public Works Reviews. London: Lomax Erskine and Co., vol.55, n.648, p.903-905, 1960.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. 2007. 147 p. Dissertação (Mestre em Engenharia)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto : Microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. Ibracon, 2014. 782 p.

MENDES, M. e. et al. **A importância da qualidade da água reagente no laboratório clínico**. J Bras Patol Med Lab. v. 47. n. 3. p. 217-223. Junho, 2011.

MENDES, K.S. **Viabilidade de emprego de finos de basalto em concreto compactado a rolo**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 109p. 1999.

NAKAMURA, Juliana. **Solos moles pedem fundações profundas : conheça as principais alternativas**. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/solos-moles-pedem-fundacoes-profundas-conheca-as-principais-alternativas_14702_10_0>. Acesso em: 17 nov. 2018.

NBR 12253: **Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento**. ABNT, 2010.

NBR 5733: **Cimento Portland com Alta Resistência Inicial**. ABNT, 1991.

NBR 6122: **Projeto e execução de fundações**. 1996.

NBR 6459: **Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. ABNT, 2016.

NBR 7180: **Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. ABNT, 2016.

NBR 7181: **Solo – Análise Granulométrica**. ABNT, 2018.

NBR 7182: **Solo – Ensaio de Compactação**. ABNT, 2016.

NOBREGA, A. K. C. et al. **Caracterização do resíduo de pó de pedra ornamental adicionado à argamassa em substituição parcial ao cimento**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [S.l.], [200-?].

PAIVA, Sergio Carvalho de *et al.* **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal**. Rio de Janeiro, 2016.

PEREIRA, Caio. **Tipos de fundações**. 2017. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-fundacoes/>>. Acesso em: 15 nov. 2018.

ROSA, Daniela Aliati. **Relação entre Resistência à Tração e à Compressão de um Solo Fino Artificialmente Cimentado**. Porto Alegre, 2013.

SARTORI, Guilherme. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de campo mourão**. 2015. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

SILVANI, Carina. **Capacidade de cicatrização pós-dano de uma mistura solo residual, cal e resíduo do beneficiamento de ágatas e ametistas**. 2010. 26 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)- Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. 2000. 132 p. Dissertação (Mestre em Engenharia)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

TEIXEIRA, Marcos Fernandes; COSTA, Raphael de Vicq Ferreira da. **Impactos ambientais da extração e beneficiamento da rocha esteatito (pedra-sabão) um estudo de caso: na região de santa rita de ouro preto, MG**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 2, Vol. 1. pp 257-310, Abril de 2017. ISSN:2448-0959

TENÓRIO, E. A. G. **Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal**. 2018. Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

VILAÇA, Maria Gabriela *et al.* **Caracterização de um solo expansivo do município de Paulista no estado natural e após tratamento com areia**. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2018, Salvador, Bahia, Brasil. Recife: [s. n.], 2008