



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

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM SOLO ESTABILIZADO
COM RESÍDUO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

HALLEXSANDRYNE DRIHELLY GOMES DO NASCIMENTO

Orientadores: Prof^ª. Dsc. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Gabryelle Keith Avelino Cruz

CAMPINA GRANDE – PB

2019

HALLEXSSANDRYNE DRIHELLY GOMES DO NASCIMENTO

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM SOLO ESTABILIZADO COM
RESÍDUO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Campina Grande como requisito para
obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Civil.

Área de habilitação: Geotécnica

Sub-área: Solos.

Orientadores: Prof^ª. Dsc. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Gabryelle Keith Avelino Cruz

CAMPINA GRANDE – PB

2019

HALLEXSSANDRYNE DRIHELLY GOMES DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM SOLO ESTABILIZADO
COM RESÍDUO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Aprovada em: ____ de _____ de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Nota: _____

Prof^ª. DSc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
(Presidente – Orientadora)

Nota: _____

Gabryelle Keith Avelino Cruz
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
(Orientadora)

Nota: _____

Prof. Msc. Paulo Germano Tavares Marinho Filho
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
(1º Examinador)

Nota: _____

Albaniza Maria da Silva
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
(2º Examinador)

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, por sua infinita bondade em guiar meus passos e nunca me desamparar, sendo sempre o meu alicerce. Ele é o Senhor da minha vida!

Aos meus pais, Roseane e Nascimento, por toda dedicação em me ver realizando meus sonhos, nunca medindo esforços em suprir minhas necessidades ao longo dessa jornada, por todo amor, carinho e conselhos, sempre se fazendo presentes e sendo meus melhores amigos e fortaleza.

A todos os meus amigos de Campina Grande, em especial a minha amiga Alana que esteve ao meu lado durante meu último ano de jornada acadêmica me dando suporte tanto emocional quanto acadêmico, você foi minha família nessa cidade, obrigada amiga!

À minha amiga Larissa que além disso foi minha companheira de estudos, de viradas de madrugada dividindo os “aperreios” da universidade, minha companhia na academia, no lazer e na vida, espero levar você para sempre na minha vida. Obrigada por tudo.

À minha orientadora, professora Lêda, por sempre ter me dado oportunidade até quando eu ainda não havia entrado em Engenharia Civil, exercendo com excelência sua função de professora e indo além com sua verdadeira preocupação de mãe por seus orientandos. Nutro pela senhora verdadeira admiração, respeito e carinho. Obrigada.

À minha coorientadora, Gabryelle, por sempre se fazer presente, nunca medindo esforços em me ajudar e a qualquer outra pessoa que dela precisar, sou grata por todo crescimento acadêmico que me proporcionou, por todos os lanches no LEP e puxões de orelha. Você é incrível.

Ao Eduardo por me permitir fazer parte de sua pesquisa do mestrado e por todo conhecimento a mim repassado.

A todos os funcionários do LEP, em especial a Daniel, Jadilson e Ildinho por todo auxílio durante os ensaios e pela convivência durante toda época de PIVIC e pesquisa do TCC.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente com essa conquista.

Meu muito obrigada.

*“Porque para Deus não
haverá impossíveis em
todas as suas promessas”
(Lucas 1:37)*

RESUMO

O crescimento acelerado do mercado de rochas ornamentais é responsável pela geração de resíduos no Brasil e no mundo, causando impactos ambientais desde a etapa de corte da rocha até a deposição desse material de forma inadequada no meio ambiente. Esses impactos são a diminuição da produtividade agrícola, poluição atmosférica, problemas de vinculação de saúde pública, entre outros. Dessa forma, se faz importante a busca de alternativas para reciclagem desses resíduos. Na mecânica dos solos, os solos expansivos são do tipo que necessitam de um melhoramento para terem propriedades mecânicas e de deformabilidades adequadas para uso na construção civil. Estudos têm sido desenvolvidos a partir do uso de resíduo de rochas ornamentais como uma proposta para a estabilização desse tipo de solo, uma vez que a cal presente no resíduo, em contato com o solo, promove reações pozolânicas e de cimentação, sendo essas responsáveis por conferir ao solo melhorias nas propriedades de resistência e no controle da expansão. Portanto, a presente pesquisa avaliou a utilização do resíduo de rochas ornamentais como estabilizador e melhorador da resistência mecânica de um solo expansivo. O estudo também foi realizado com a cal como aditivo para o mesmo solo com a finalidade de comparar o desempenho de ambos estabilizantes em relação às suas reações de estabilização com o solo. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização física do solo, avaliação da atividade pozolânica e caracterização química do resíduo. O pesquisa foi realizada com a fabricação de 27 corpos de provas para cada estabilizante nos pesos específicos aparente seco de 14, 15 e 16 KN/m³ variando-se o teor de cada aditivo. Sendo os teores de 4%, 6% e 8% de cal adicionado ao solo e nos teores de 30%, 40% e 50% de resíduo de rochas ornamentais para realização do ensaio de resistência à compressão simples. Durante a pesquisa, foi possível observar que o resíduo utilizado não apresentou reações pozolânicas capazes de conter a expansão do solo, dessa forma, o processo de cura dos corpos de prova solo-resíduo se deu sem inundação. A partir da análise dos resultados dos ensaios percebeu-se que a cal reage de forma positiva com o solo mas o resíduo apresentou-se praticamente inerte. A análise da resistência mecânica permitiu observar que o aumento do teor de cal juntamente com o aumento do valor do peso específico seco proporcionou aumento da resistência mecânica do solo, confirmado a partir da redução da porosidade, que por sua vez possibilitou melhor interação entre o solo e a cal. Todavia, a estabilização com o resíduo proporcionou pouco aumento da resistência quando foi acrescido o teor do aditivo juntamente com o aumento do valor do peso específico seco do solo. Os resultados permitiram concluir que os valores de resistência a compressão simples do solo com o resíduo foram inferior comparado ao solo com cal, sendo a curva de crescimento quase que constante para o resíduo e crescente para a cal. No entanto se faz necessário um estudo mais aprofundado com um resíduo que contenha maiores quantidades de mármore, de forma a proporcionar reações pozolânicas necessárias a contenção da expansão do solo em estudo, com conseqüente melhoramento nos valores de sua resistência mecânica, proporcionando, assim, um destino adequado do ponto de vista ambiental para esses tipos de resíduos.

Palavras chave: estabilização de solos, reações pozolânicas, rochas ornamentais.

ABSTRACT

The accelerated growth of the ornamental stone market is responsible for waste generation in Brazil and worldwide, causing environmental impacts from the rock cutting stage to the improper disposal of this material in the environment. These impacts include decreased agricultural productivity, air pollution, public health linkage problems, among others. Thus, it is important to provide alternatives for recycling these wastes. In soil mechanics, expansive soils are of the type that need upgrading to have mechanical properties and deformability suitable for use in construction. Studies have been developed from the use of ornamental rock residue as a proposal for the stabilization of this type of soil, since the lime present in the residue, in contact with the soil, promotes pozzolanic and cementation reactions, which are responsible for give the soil improvements in resistance properties and expansion control. Therefore, the present research evaluated the use of ornamental rock residue as stabilizer and mechanical strength enhancer of an expansive soil. The study was also conducted with lime as an additive for the same soil in order to compare the performance of both stabilizers in relation to their stabilization reactions with the soil. For this, physical characterization of the soil, evaluation of the pozzolanic activity and chemical characterization of the residue were performed. The research was carried out with the manufacture of 27 specimens for each stabilizer in the apparent dry specific weights of 14, 15 and 16 KN / m³ varying the content of each additive. The contents of 4%, 6% and 8% of lime are added to the soil and the contents of 30%, 40% and 50% of ornamental rock residue to perform the uniaxial compressive strength test. During the research, it was possible to observe that the waste used did not present pozzolanic reactions capable of containing the soil expansion, thus, the curing process of the soil-residue specimens occurred without flooding. From the analysis of the test results it was noticed that lime reacts positively with the soil but the residue was practically inert. The mechanical strength analysis showed that the increase of lime content together with the increase of dry specific weight value increased the mechanical strength of the soil, confirmed by the reduction of porosity, which in turn allowed a better interaction between the soil. and lime. However, stabilization with the residue provided little increase in resistance when the additive content was added together with the increase of the dry specific soil weight value. The results allowed to conclude that the values of simple compressive strength of the soil with the residue were inferior compared to the soil with lime, being the growth curve almost constant for the residue and increasing for the lime. However, further study is required with a residue that contains larger amounts of marble, in order to provide pozzolanic reactions necessary to contain the expansion of the soil under study, with consequent improvement in the values of its mechanical resistance, thus providing a environmentally sound destination for these types of waste.

Key words: stabilization of soils, pozzolanic reactions, ornamental rocks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos resíduos provenientes do processamento do mármore (SILVA, 2016)	15
Figura 2 - Pedreira de mármore localizada em Borba - Alentejo (SILVA, 2016)	16
Figura 3 - Depósito de Resíduo de Mármore (SILVA, 2016).....	17
Figura 4 - Vala em Paulista PE, Local onde foram coletadas as amostras do solo.	29
Figura 5 - Resíduo de Mármore.	29
Figura 6 - Cal utilizada na pesquisa.	30
Figura 7 - Fluxograma das atividades de pesquisa.....	31
Figura 8 - Curva granulométrica do solo.....	32
Figura 9 - Curva de compactação.....	35
Figura 10 - Difração de raio x do resíduo de mármore	37
Figura 11 – ICL entre solo expansivo e cal.....	38
Figura 12 – ICM entre solo expansivo e resíduo de mármore	39
Figura 13 - Molde de aço	40
Figura 14 - Prensa de moldagem.....	41
Figura 15 - Prensa mecânica	42
Figura 16 - Resistência à compressão dos corpos de prova com adição de cal.....	44
Figura 17 - Resistência a compressão simples versus porosidade do solo estabilizado com cal.....	45
Figura 18 - Resistência à compressão simples do solo estabilizado com resíduo de mármore... ..	46
Figura 19 - Comparativo entre o solo-cal e o solo-resíduo, sendo $\gamma_d = 16\text{kN/m}^3$ e teores de 8% e 50%, respectivamente.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros de cada solo artificial (SIVRIKAYA, KIYILDI E KARACA, 2013).....	24
Tabela 2 - Ensaio de caracterização física do solo.	32
Tabela 3 - Composição do solo.....	33
Tabela 4 - Limites de Atterberg	34
Tabela 5 - Atividade pozolânica do resíduo de mármore.....	36
Tabela 6 - Composição química do resíduo de mármore – Fluorescência de raio x.....	36
Tabela 7 - Variáveis fixadas.....	39
Tabela 8 - Variáveis investigadas.....	40
Tabela 9 - Valores da média, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados analisados.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	O Resíduo de Mármore	13
2.1.1	Produção de resíduo de mármore	14
2.1.2	Impactos Ambientais – Potencial poluidor do resíduo de mármore.....	16
2.1.3	Gestão e destino adequado para o resíduo de mármore	18
2.1.4	Estabilização de solos.....	19
2.1.5	Processos de estabilização.....	20
2.1.6	Solo cimento.....	21
2.1.7	Solo cal.....	22
2.1.8	Solo estabilizado com resíduo de mármore.....	23
2.2	Resistência dos Solos Estabilizados	25
3	METODOLOGIA	28
3.1	Materiais.....	28
3.1.1	Solo	28
3.1.2	Resíduo de Mármore	29
3.1.3	Cal	30
3.2	Métodos.....	31
3.2.1	Caracterização Física do Solo	32
3.2.2	Atividade pozolânica.....	35
3.2.3	Composição química do resíduo de mármore	36
3.2.4	Estabilização do solo	37
3.2.5	Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	41
4	RESULTADOS	43
4.1	Ensaio de Compressão Simples em Solo Estabilizado com Cal	43
4.2	Ensaio de Resistência à compressão simples do solo estabilizado com resíduo de mármore	45
4.3	Análise da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação	46
4.4	Análise comparativa Cal x Resíduo de Mármore para melhoria da Resistência mecânica do solo	48
5	CONCLUSÃO	51
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

O mercado das rochas ornamentais caracteriza uma das atividades industriais que mais têm crescido nos últimos anos no Brasil e no mundo. Entretanto, esse crescimento ocasiona o aumento da produção de resíduos oriundos do corte de mármore e granito. No Brasil, a quantidade estimada da geração conjunta do resíduo de corte de mármore e granito é de 240.000 toneladas/ano, distribuídas principalmente entre Espírito Santo, Bahia, Ceará e Paraíba, ocorrendo também nos outros estados (MOURA *et al.*, 2002).

Uma forma de diminuir os problemas causados pelo acúmulo de resíduos é a sua reciclagem. Algumas alternativas para mitigar este problema já foram estudadas como a produção de agregados reciclados utilizados para substituírem agregados naturais, a utilização de resíduos na produção de concretos, argamassas, pavimentos, contenções, aterros, solos reforçados, entre outros (FERREIRA & THOMÉ, 2011).

O uso desses materiais como matéria-prima em outros processos produtivos pode transformar resíduos em subprodutos úteis, diminuindo as quantidades que são depositadas em aterros e contribuindo com a minimização dos impactos ambientais (MANHÃES & HOLANDA, 2008).

Na construção civil, o solo é o material mais empregado desde obras simples, como casas de adobe até estruturas complexas, como contenção de barragens, aterros e sub-base de pavimentos. Para a sua utilização é necessário que apresente as propriedades adequadas e essas variam de acordo com o clima, a origem e o meio ambiente ao qual é extraído. Podendo em algumas regiões ocorrer escassez de solos adequados para certas obras (LATIFI *et al.*, 2017).

A escassez de solos que apresentem melhor desempenho para obras, como as citadas, resulta na busca por materiais de melhor qualidade em localidades mais distantes que implica em um maior custo e por vezes, inviabiliza a execução. Assim, torna-se fundamental a busca por métodos de melhoramento de solos que proporcionem estabilização e aumento da resistência deste, oferecendo a possibilidade de aplicação de materiais que antes seriam dispostos de forma incorreta no meio ambiente.

O mármore é uma rocha de origem calcária e em sua constituição existem teores significativos de óxido de cálcio, sendo esse um elemento importante quando procura-se um destino adequado para os resíduos oriundos do corte dessa rocha ornamental. Estudos

como os de Oliveira (2010) apontam resultados satisfatórios de aumento de resistência e estabilização de solos utilizando a cal.

A cal é comercialmente produzida pela calcinação de calcário britado, na qual o carbonato de cálcio presente na rocha é reduzido a óxido de cálcio. O óxido de cálcio produzido recebe o nome de cal cálcica, e o produto contendo este óxido e o óxido de magnésio é denominado cal dolomítica, sendo ambos os tipos conhecidos como cal viva. Que por sua vez, quando controladamente sofre adição de água se transforma em cal hidratada.

A cal presente no mármore pode vir a reagir com o solo e a água desencadeando reações pozolânicas e cimentação (KUSHWAH & GUPTA, 2017; YILMAZ & YURDAKUL, 2017). A cimentação confere ao solo melhorias nas propriedades de resistência, tornando-o apto para uma maior gama de empreendimentos. Ressalta-se também a possibilidade de o resíduo de mármore combater a tendência expansiva de solos com esta característica (CHAO-LUNG, ANH-TUAN & CHUN-TSUN, 2011).

De modo geral, todos os solos de granulometria fina reagem com a cal pois ocorrem trocas catiônicas e floculações entre esses e a cal que afetam, benéficamente, as suas características de trabalhabilidade, plasticidade e caráter expansivo, bem como reações de carbonatação. Desta forma, utilizar o resíduo de mármore com o intuito de que a cal presente em sua composição reaja com o solo e proporcione aumentos de resistência surge como uma opção viável.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar a resistência mecânica de um solo estabilizado com resíduo oriundo de rochas ornamentais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- avaliar a resistência a compressão simples do solo incorporado com resíduo oriundo de rochas ornamentais e do mesmo solo incorporado com a cal;

- analisar como a dosagem de diferentes teores do resíduo e da cal influencia na resistência mecânica do solo;
- comparar o desempenho do resíduo e da cal na estabilização do solo em termos de resultados da resistência mecânica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo busca-se apresentar a revisão teórica acerca dos temas mais relevantes ao desenvolvimento desse trabalho, tais como: o resíduo de mármore, produção do resíduo de mármore, impactos ambientais – potencial poluidor do resíduo de mármore, gestão e destinação adequada para o resíduo de mármore, estabilização de solos e seus processos de estabilização, resistência de solos estabilizados e aplicações com solos estabilizados.

2.1 O Resíduo de Mármore

Mármore são rochas metamórficas constituídas por 50% ou mais de minerais carbonáticos, com ênfase a calcita (CaCO_3) e dolomita (MgCO_3) (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998). Os mármore têm como principal aplicação a produção de rochas ornamentais para a indústria da construção civil. O processo de corte do mármore produz resíduos extremamente finos, menores que 2 mm, e que podem desencadear problemas ambientais quando sua disposição final é realizada de forma inadequada.

Os resíduos produzidos no beneficiamento de mármore e granitos se apresentam em grande quantidade e como um potencial problema ambiental. Segundo Apolinário et al. (2013) o Brasil é um dos maiores produtores de rochas ornamentais do mundo, em que sua produção chega a 7,8 milhões do total de 105 milhões de toneladas produzidos mundialmente, sendo que 1,25 milhões de toneladas são de resíduos relacionados à produção e ao beneficiamento das rochas. Segundo Moura et al. (2002) 25 a 30% dos blocos de rochas que são extraídos da natureza se transformam em pó, que ficam depositados nos pátios das empresas.

A destinação desse material envolve o descarte em aterros, para isso as empresas precisam arcar com custos altos de transporte e inclusive de ocupação dos aterros de

destinação. Por isso, muitas vezes esses resíduos ficam acumulados nos pátios ou são descartados de forma inadequada.

O descarte inadequado pode ocasionar diversos problemas inclusive o comprometimento da produtividade agrícola, pois as partículas podem ser transportadas pelo ar e água comprometendo a qualidade da água e do solo, assim como causam poluição atmosférica (BALKIS, 2017).

Assim, a indústria de beneficiamento de mármore e granito vem despertando cada vez mais o interesse dos ambientalistas. Nas etapas de produção (nomeadamente, extração, corte, serragem e polimento dos blocos de pedra) as perdas podem ser da ordem de 30 a 40%. Atualmente, e em grande parte dos casos, existe pouca preocupação com o meio ambiente sendo o rejeito jogado diretamente em lagoas e rios, sem nenhum tratamento prévio, constituindo um sério problema ambiental (NITES, 1994 apud SILVA et al, 2005).

Dessa forma, o conhecimento das características do resíduo dessas rochas ornamentais é fundamental para o desenvolvimento de soluções sustentáveis de forma a proporcionar um descarte adequado e valorizar esse produto.

2.1.1 Produção de resíduo de mármore

A indústria de extração e transformação da pedra natural está presente em todo mundo devido sobretudo à sua importância para o setor da construção civil. Estas atividades estão associadas à produção de elevadas quantidades de resíduos, que por sua vez ficam armazenados a céu aberto e sem uma aplicabilidade definida (MACHADO, 2012).

A produção de rochas ornamentais, na maioria das empresas brasileiras, é feita a partir da serragem, em chapas, de grandes blocos de pedra, em equipamentos chamados teares. Na serragem, cerca de 25% a 30% do bloco são transformados em pó, que é depositado nos pátios das empresas. No Brasil, a quantidade estimada de geração conjunta do resíduo de corte de mármore e granito é de 240000 toneladas/ano, distribuídas entre Espírito Santo, Bahia, Ceará, Paraíba, entre outros estados (MOURA et al, 2002).

De acordo com Silva et al (2005) no estado do Espírito Santo, maior explorador do setor, a produção estimada de lama abrasiva de mármore e granito das indústrias da região está em torno de 4000 toneladas por mês.

A produção de resíduos, durante o beneficiamento de rochas ornamentais, é gerada em quantidades significativas em forma de lama constituída por pó de pedra, cal, água e granalha metálica e pó de pedra com retalhos de rochas sendo o pó produzido durante o processo de corte e polimento (DESTEFANI, 2009).

Os resíduos de mármore produzidos, durante o processamento, podem ser classificados de acordo com a dimensão das suas partículas (Figura 1). Segundo Silva (2016) as partículas de maiores dimensões são provenientes de blocos e placas de mármore defeituosas ou partidas, enquanto as de tamanho médio a pequeno, como por exemplo as lascas, são produzidas durante o acabamento dos blocos e placas. As partículas com dimensões reduzidas são constituídas por pó ou lamas, caso o pó esteja misturado com água.

Figura 1 - Classificação dos resíduos provenientes do processamento do mármore (SILVA, 2016)



As lamas são geradas a partir da fabricação dos produtos em pedra natural durante as diferentes etapas do processo, nomeadamente na serração dos blocos, no corte das placas e no acabamento final dos produtos. No decorrer dessas fases originam-se partículas muito finas que, ao serem misturadas com água durante o seu transporte, formam uma mistura fluída que é conduzida para lagos de decantação presentes na periferia das unidades industriais, onde os sedimentos se depositam no fundo (CEVALOR et al., 2012 apud SILVA, 2016).

A composição dos resíduos de serragem depende do tipo de teor utilizado e também do tipo de rocha processada, já que aproximadamente 30% do bloco são transformados em pó e incorporados à lama que é descartada em lagoas de secagem.

Muitas vezes, esses são locais não licenciados e que não possuem a proteção exigida pelos órgãos ambientais. A utilização destes resíduos como subprodutos em outros processos produtivos é fundamental para diminuir a quantidade de rejeito descartado no ambiente, além de agregar valor a um material anteriormente indesejável (BERTOSSI et al., 2011).

2.1.2 Impactos Ambientais – Potencial poluidor do resíduo de mármore

Segundo a Resolução nº 001 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (1986) a expressão impacto ambiental é definida como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas. Essas atividades, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986).

Desta forma o processo de corte e polimento do mármore e granito, nas marmorarias, é responsável por uma variedade de impactos, desde a degradação da paisagem (Figura 2) até a geração de resíduos poluidores. No processo de corte destas rochas utiliza-se a água para evitar o superaquecimento das máquinas e minimizar a poeira gerada neste processo. A mistura do pó com a água, proveniente desta operação, resulta em lama de mármore. A quantidade de resíduos gerados é despejada no meio ambiente em sua forma inicial ou após desidratação em uma estação de tratamento (ALYAMAÇ; TUĞRUL, 2014).

Figura 2 - Pedreira de mármore localizada em Borba - Alentejo (SILVA, 2016)



As ameaças causadas pela deposição dos resíduos de pó de mármore, sem as devidas precauções, podem ser de carácter físico, químico e biológico. Bdour e Al-Juhani (2013) apud Silva (2016) citam algumas das consequências associadas à acumulação deste tipo de resíduos a céu aberto:

- diminuição da produtividade agrícola do solo, devido ao decréscimo da sua porosidade, absorção de água, capacidade da água percolar no seu interior, etc.;
- poluição atmosférica, devido à circulação do pó de mármore, após a sua secagem:
 - problemas de saúde, quando ocorre a inalação do pó de mármore;
 - redução do desempenho das máquinas e equipamentos, situados nas zonas industriais, devido à acumulação do pó de mármore que circula no ar;
 - limitação da capacidade de armazenamento e diminuição da qualidade da água, durante a estação das chuvas, o que apresenta consequências nefastas para a vida aquática;
 - do ponto de vista estético, os montes de pó de mármore dispersos (Figura 3) acabam por ser desagradáveis e estragam a paisagem da região onde estão inseridos, afetando negativamente as atividades sociais e industriais da zona.

Figura 3 - Depósito de Resíduo de Mármore (SILVA, 2016)



A lama gerada pela indústria de mármore e granito, quando seca, desprende poeira que afeta os equipamentos, as pessoas e a todo o ambiente ao redor. Os valores típicos

dos diâmetros esféricos equivalentes das partículas das lamas são entre 1µm e 100 µm, caindo na faixa que pode se alojar dentro dos pulmões (TASAICO, 2007).

Tendo em vista o elevado impacto ambiental provocado pela exposição desse resíduo a céu aberto, se faz importante a destinação adequada desse produto bem como o emprego de tecnologias na produção desse tipo de rocha ornamental a fim de evitar a produção excessiva de resíduos.

2.1.3 Gestão e destino adequado para o resíduo de mármore

O gerenciamento de resíduos sólidos refere-se a um conjunto de ações em diversas partes do processo produtivo e em atividades relacionadas com ele visando a proteção e melhora da qualidade do meio ambiente, da saúde humana e uma utilização racional dos recursos naturais (SILVA, 2002).

De modo a tentar resolver os problemas, causados pelos resíduos provenientes da indústria extrativa, deve ser elaborado um plano de gestão de resíduos que deve atuar quer a nível da prevenção ou redução da produção de resíduos, quer no incentivo à recuperação dos resíduos por meio da sua reciclagem, reutilização ou valorização, respeitando assim o ambiente (CEVALOR et al., 2013 apud SILVA, 2016).

A gestão efetiva dos resíduos industriais das diversas atividades de beneficiamento dos mármore e granitos, dentre outras rochas, ainda fica na dependência de um pré-tratamento para viabilizar seu aproveitamento. Pode ser realizado também por meio de um armazenamento adequado em aterros industriais controlados, enquanto não se viabiliza seu aproveitamento (RAYMUNDO, 2008).

Em relação a gestão do resíduo de mármore gerado, uma alternativa é a sua reutilização, inserindo-o em uma outra cadeia produtiva. Dessa forma, reduziria o problema de descarte e ainda possibilitaria um incremento na renda das empresas, uma vez que o resíduo passaria ser vendido ao invés de descartado

Os principais resíduos gerados são: a lama abrasiva, os cascalhos e os pedaços de bloco. Anteriormente, com a criação de legislações ambientais e sanções menos criteriosas, as empresas descartavam a lama junto ao esgoto direto nos rios ou em tanques chamados “cavas”, feitos de forma inadequada, provocando assoreamento e contaminação do lençol freático. Atualmente, com uma maior preocupação e cobrança, a busca por uma destinação adequada vem se tornando um dos maiores objetivos tanto das

empresas responsáveis como também de pesquisadores da área, que sugerem, por exemplo a adição desses resíduos em solos como reforço e estabilizante.

Segundo Almeida (2014) vêm sendo desenvolvidas novas metodologias para a reutilização dos resíduos na produção de matérias com a preocupação de que estes não perdessem suas características e também que durante a fabricação não produzam maiores gastos energéticos. Outro empenho ocorre para diminuir parte do consumo de matéria-prima natural e não renovável, incorporando resíduos de rocha em sua composição.

2.1.4 Estabilização de solos

Estabilização de solos é uma técnica que permite melhorar as propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo, de forma a tornar este material adequado a um emprego específico. De um modo geral, estabilizar um solo é utilizar um processo de natureza física, físico-química ou mecânica, para tornar esse solo estável para os limites de sua utilização, fazendo com que esta estabilidade permaneça sob ações de cargas externas e ações climáticas variáveis

O processo de estabilização de um solo envolve propriedades de resistência do solo e da suplementação necessária desta resistência para um determinado uso, em termos mecânicos, físicos, físico-químicos e químicos. As propriedades físicas e químicas do solo, assim como as solicitações do empreendimento, são fatores decisivos na escolha do método de estabilização (SANTIAGO, 2001). Logo, a estabilização é um processo individual que varia para cada empreendimento e tipo de solo.

A estabilização de solos pode ocorrer por meio de métodos mecânicos ou químicos. A estabilização mecânica consiste em alterar o estado do solo por meio de esforços mecânicos, compactação ou vibração, que visam reduzir o índice de vazios associado a alterações na granulometria do material. A estabilização química constitui-se em melhorar as propriedades do solo por meio de estabilizantes que reagem com os minerais do solo promovendo cimentações e conseqüente otimização dos parâmetros de resistência do solo (SANTIAGO, 2001; MAKUSA, 2012).

De acordo com Medina e Motta (2004) as propriedades de engenharia que se visa modificar na estabilização de um solo são:

- resistência ao cisalhamento: tornando-a menos sensível às mudanças ambientais, principalmente à umidade, além de torná-la compatível com as cargas que a estrutura vai absorver;
- permeabilidade: aumentando-a ou diminuindo-a;
- Compressibilidade, reduzindo-a.

2.1.5 *Processos de estabilização*

De acordo com Guimarães (2002) a estabilização de solos pode ser obtida por técnicas, que são reunidas em dois grandes grupos:

- as que empregam meios mecânicos: correção da granulometria e da plasticidade por meio da incorporação ou retirada de determinadas quantidades de frações constituintes do solo, até a obtenção de parâmetros estabelecidos por normas;
- as que empregam meios químicos: utilização de aditivos orgânicos ou inorgânicos, como a cal, o cimento Portland, silicatos de sódio, materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo e outros.

Segundo com Gondim (2008) são considerados métodos de estabilização mecânica, os procedimentos que alteram apenas o arranjo das partículas do solo ou a granulometria deste. A autora menciona, ainda, que dentre os métodos existentes se sobressaem à compactação e a estabilização granulométrica.

A estabilização mecânica por compactação refere-se ao processo de tratamento de um solo com a finalidade de minimizar sua porosidade pela aplicação de sucessivas cargas, pressupondo que a redução de volume de vazios é relacionada ao ganho de resistência mecânica. (SANTOS et al, 1995).

O International Focus Group on Rural Road Engineering – IFG (2005) relata que o processo de estabilização química envolve a adição de um agente estabilizante ao solo fazendo com que este atinja uma umidade ótima adequada, uma compactação eficiente e uma cura final que assegure a obtenção de uma resistência potencial satisfatória.

Guimarães (2002) comenta que a opção pelo método de estabilização, mecânico ou com a inserção de aditivos químicos, é influenciada por uma série de fatores, entre os quais destacam-se: os econômicos, a própria finalidade da obra, as características dos materiais e as propriedades do solo que devem ser corrigidas. Além disso, o autor relata

que os solos das regiões tropicais úmidas, particularmente, recebem tratamentos deficientes sobre seus problemas devido às significativas diferenças entre suas propriedades e comportamento, exigindo um número maior de estudos e pesquisas para se chegar aos procedimentos mais apropriados.

2.1.6 Solo cimento

Segundo Makusa (2013), o cimento é um aglomerante hidráulico, sendo considerado como um agente estabilizador de solos primário, pois não depende dos minerais disponíveis no solo, apenas da presença de água, que está disponível na maioria dos solos. Esta é uma das razões pela qual o cimento pode ser usado sozinho para provocar a ação estabilizadora necessária em vários tipos de solos.

Pode-se afirmar que a estabilização solo-cimento é o produto da combinação de solo, cimento e água, em proporções determinadas por ensaios de laboratório, e de um processo construtivo que leva/ estes materiais, após mistura e compactação no campo, a uma massa específica seca fixada em ensaios de laboratório. A experiência brasileira no emprego de camadas de base e sub-base de solo-cimento baseia-se nos métodos de dosagem da "Portland Cement Association (PCA)" (FERRAZ, 1994).

Pode-se dividir a estabilização pelo cimento em categorias, conforme (Medina,1987):

- solo-cimento: é um material endurecido pela cura de uma mistura íntima compactada mecanicamente de solo pulverizado, cimento portland e água, sendo esse endurecimento avaliado por critérios de durabilidade e resistência à compressão simples de corpos de prova. Normalmente é utilizado como base ou sub-base;
- solo modificado ou melhorado: é um material não endurecido ou semi-endurecido que é julgado pela alteração dos índices físicos e ou capacidade de suporte do solo. Utiliza-se um teor baixo de cimento que não deve ser maior que 5%. Pode ser utilizado como base, sub-base ou subleito;
- solo-cimento plástico: difere do solo cimento definido antes por ser utilizada uma quantidade maior de água durante a mistura de forma a produzir uma consistência de argamassa na ocasião da colocação. É utilizado para revestimento de valas, canais e taludes.

Os solos tratados com cimento adquirem resistência mecânica devido as reações de hidratação. O processo de hidratação do cimento origina fortes ligações entre as partículas de solo dificultando o movimento entre as partículas. Desta forma o solo tratado adquire resistência ao cisalhamento e redução da plasticidade (ALMEIDA, 2016).

O efeito produzido pelo cimento pode ser visto de duas formas distintas, conforme se refira a solos granulares ou a solos coesivos. Nos primeiros, o aditivo destina-se, principalmente, a criar ligações nos contatos intergranulares de modo a garantir resistência mais efetiva do material às solicitações externas por aumento da parcela resistente relativa à coesão. No caso dos solos finos, os grãos de cimento comportam-se como núcleos aos quais aderem pequeníssimas partículas de solo que os rodeiam, formando regiões de materiais floculados que apresentam ligações oriundas dos fenômenos de cimentação. A dosagem do solo-cimento processa-se pelo estudo do solo por meio dos ensaios de caracterização, e da mistura via ensaios de compressão não-confinada. Assim, todo solo pode ser estabilizado com cimento; no entanto, é regra básica que o teor de cimento empregado aumenta com o teor de argila, o que torna os solos arenosos mais favoráveis a esta modalidade de estabilização (LIMA et al, 2003).

2.1.7 Solo cal

Uma das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem para obtenção da estabilização ou melhoria de solos instáveis é a da adição da cal (GUIMARÃES, 2002). A cal constitui um dos mais antigos aglomerantes utilizados pelo homem, há registros do seu emprego em obras ao redor do globo com a via de Àpia, sul da Itália, construída em 312 a.C e em trechos da muralha da china construídos em 228 a.C (OLIVEIRA, 2010).

As reações entre o solo e a cal podem ser (MEDINA, 1987):

- rápida ou imediata: floculação e permuta iônica;
- reações lentas: reação pozolânica, carbonatação e formação de novos compostos cristalinos.

A cal pode ser empregada isoladamente como aditivo ou atuar em conjunto com outros estabilizadores. O emprego individual da cal promove a floculação das partículas argilosas por meio da troca de bases com os argilo-minerais, esta reação promove o aumento do ângulo de atrito do solo e consequente otimização da resistência ao cisalhamento (OLIVEIRA, 2010).

Alguns efeitos podem ser esperados pela adição da cal no solo, como a modificação da granulometria do solo, devido à ocorrência de floculação; aumento do limite de plasticidade (LP) e diminuição do limite de liquidez (LL); redução das variações de volume dos solos expansivos; redução da densidade e elevação do teor de umidade; além do aumento da resistência à compressão simples (BRITO E PARANHOS, 2017).

A reação pozolânica ocorre no solo estabilizado com cal originando substâncias cimentantes que aumentam continuamente a resistência mecânica do solo. Este processo deve-se a reação da cal com água e a sílica, ferro e alumínio presentes no solo. A cal eleva o pH do solo fazendo com que os silicatos sejam dissolvidos da argila o que origina um gel de silicatos de cálcio hidratados. Esse gel envolverá as partículas de argila que cristalizará no decorrer do tempo. Como resultado tem-se um solo menos permeável, com um índice de vazios menor e maior resistência mecânica (VILLALNA KANAZAWA, 2015).

Os estudos de laboratório têm indicado a eficácia da cal, notadamente em solos argilosos e expansivos. Em termos gerais, os solos mais reativos com cal são os seixos argilosos, as argilas siltosas e as argilas puras. Quando o argilo mineral componente da fração fina do solo é a caulinita, a reação com a cal se processa de uma forma lenta, principalmente se a fração argilosa for constituída predominantemente por óxidos e hidróxidos de ferro, caso em que a reação pode até mesmo se anular. Se, ao contrário, estiverem presentes na fração fina os minerais aluminosos (óxidos e hidróxidos de alumínio), que são comuns nos solos ferralíticos da América do Sul, África e seus similares do Sudeste Asiático, a reatividade com a cal é grande, o que torna a estabilização, nestes casos, bastante satisfatória (GUIMARÃES, 1971).

Há que se considerar que há sempre reação da cal com qualquer tipo de solo, com ganhos de qualidade na mistura, desde que o mesmo tenha material fino correspondente à fração argilosa na sua composição, e este ganho será mais efetivo, quanto maior seja esta fração argilosa do solo, para um mesmo teor de cal e um mesmo tipo de argilomineral componente desta fração argila (AZEVEDO, 2010).

2.1.8 Solo estabilizado com resíduo de mármore

Estabilização de solos com cal e cimento é uma prática corriqueira na engenharia civil. O uso desses materiais como estabilizantes ocasiona impactos ambientais severos e implica em custos significativos ao empreendimento. Os estabilizantes alternativos

podem ser uma alternativa aos custos e impactos ambientais (POURAKBAR et al., 2015; CHAITANYA E AMMINEDU, 2017; HUAT et al., 2017; LATIFI et al., 2017; NUR et al., 2017).

Por sua vez, o resíduo de mármore vem se mostrando como uma alternativa aos estabilizantes comumente utilizados, de acordo com algumas literaturas. Em seus estudos, Okagbue e Onyeobi, (1999) utilizaram resíduos de mármore para estabilizar solos tropicais vermelhos das regiões de Garra, Ore e Auchi no sudeste da Nigéria. Os autores utilizaram água ácida para facilitar a liberação da cal (CaO) presente no resíduo de mármore. Os solos estabilizados apresentaram significativa melhoria nos parâmetros de interesse da engenharia, como redução da plasticidade e retração linear do solo expansivo, com destaque para os solos argilosos que apresentaram comportamento superior aos demais.

Sivrikaya, Kiyildi e Karaca (2013) realizaram um estudo de comparação da eficiência do resíduo de mármore calcítico e dolomítico e pó de granito na estabilização de solos argilosos. Os resíduos utilizados nesse estudo foram provenientes de empresas da Turquia. Inicialmente prepararam-se 3 tipos de solos artificiais que, posteriormente, foram misturados aos resíduos nas seguintes proporções: A (95% caulinita e 5% bentonita), B (90% caulinita e 10% bentonita) e C (80% caulinita e 20% bentonita). Ainda, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica e as misturas classificadas conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), como é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Parâmetros de cada solo artificial (SIVRIKAYA, KIYILDI E KARACA, 2013).

Solos	LL (%)	LP (%)	IP (%)	ρ_s (g/cm³)	W_{ot} (%)	ρ_d (kN/m³)	Classificação do Solo (SUCS)
A	56	20	36	2,59	24,0	13,65	Argila de alta plasticidade
B	68	20	48	2,60	26,8	14,10	Argila de alta plasticidade
C	84	28	56	2,61	27,0	14,50	Argila de alta plasticidade

LEGENDA: LL – Limite de Liquidez; LP – Limite de Plasticidade; IP – Índice de Plasticidade; ρ_s – massa específica do solo; W_{ot} – umidade ótima; ρ_d – peso específico seco máximo.

As amostras de solo foram preparadas usando bentonita e caulinita. Os resíduos foram adicionados nas proporções de 5, 10, 20, 30 e 50% em massa. Em vias gerais, os resultados dos ensaios realizados mostraram que:

- o peso específico com a adição dos resíduos aumentou significativamente com o aumento do teor de resíduo adicionado;
- com o aumento da porcentagem dos resíduos, o limite de liquidez diminuiu e o de plasticidade aumentou, gerando um decréscimo no índice de plasticidade;
- os ensaios de compactação mostraram a diminuição da umidade ótima e aumento do peso específico seco máximo com o aumento do teor de resíduos.

Por fim os autores concluíram que o aumento em proporção de todos os resíduos é eficaz na estabilização do solo, sendo o mármore dolomítico mais efetivo devido a sua composição química.

2.2 Resistência dos Solos Estabilizados

O ensaio de compressão simples é comumente utilizado a fim de obter parâmetros de resistência de solos estabilizados com aditivos como cimento Portland, cal hidratada, entre outros. Embora este ensaio não represente da melhor maneira as condições reais de campo, é um dos mais utilizados nos laboratórios para quantificar o ganho de resistência à compressão simples (RCS) das misturas de solo.

Araújo (2009) avaliou misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta nos teores de 3%, 5% e 7%, com tempos de cura de 0, 7, 14, 28 e 90 dias variando as energias de compactação em normal e intermediária. A partir da análise da resistência mecânica por meio dos ensaios de Resistência à Compressão Simples, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência foi verificado que a estabilização química realizada por meio da adição da cal (em pó e em pasta) proporcionou o incremento de resistência nas amostras naturais dos solos estudados, em função de algumas características físicas e químicas dos destes.

Dias (2012) estudou a influência da quantidade de cimento nas características de resistência e deformabilidade de misturas de solo-cimento por meio da realização de ensaios de resistência à compressão simples sob diferentes tempos de cura. Os resultados obtidos indicaram que o uso de cimento para estabilização de solos é um método que permite obter consideráveis melhorias na resistência mecânica do solo. O autor concluiu

ainda que para as duas dosagens estudadas verificou-se que quanto maior a percentagem de cimento, maior a resistência obtida, sendo o tempo de cura fundamental na resistência das misturas de solo-cimento.

Chao-Lung, Anh-Tuan e Chun-Tsun, (2011) investigaram os efeitos da adição de resíduos de mármore em um solo expansivo previamente estabilizado com cinzas volantes de arroz. Os autores concluíram que o resíduo de mármore promoveu um aumento na resistência a compressão simples até o teor de 20%, com teores maiores ocorreu perda de resistência. Os autores também observaram que a pressão de expansão do solo reduzia à medida que se adicionava resíduos de mármore.

Em seu estudo Akinwumi e Booth (2015) avaliaram as propriedades mecânicas, e hidráulicas de um solo laterítico, classificado como A-7-6 pela AASSHTO, estabilizado com resíduo de mármore. O solo foi estabilizado com resíduo de mármore nas frações de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% da massa seca do solo. Os solos tratados foram submetidos a ensaios de compressão simples sem previa saturação das amostras. Os autores constataram um aumento da resistência a compressão simples do solo estabilizado, assim como uma redução na permeabilidade e no índice de plasticidade.

Cordeiro (2016) avaliou o potencial de melhoria que as adições químicas tendem a conferir a um solo a partir da estabilização de um solo argiloso utilizado na região de Concórdia – SC por meio de adição de cal. A resistência das misturas foi determinada a partir dos ensaios de resistência à compressão simples e ISC em corpos-de-prova cilíndricos com cura de 7 e 14 dias para os teores de 3 %, 6 % e 9 % de adição de cal em relação à massa seca do solo. A autora concluiu que o teor de 9 % de adição de cal proporcionou ao solo melhor resultado quanto à compressão simples, ISC e expansão em comparação aos outros teores avaliados.

Diante disso, percebe-se que a estabilização é uma alternativa viável na melhoria da resistência a compressão simples dos solos. A escolha do tipo de estabilizante, teor ou forma de compactação dependerá da aplicação que esse solo será submetido, a exemplo de contenção de barragens, aterros e sub-base de pavimentos.

Nesse contexto, os solos expansivos quando estabilizados podem ser aplicados para diversas funcionalidades nas obras de engenharia, dependendo dos resultados obtidos em relação ao seu comportamento mecânico que deriva da reação ocorrida entre o estabilizante utilizado com o solo em estudo.

As propriedades adquiridas pelos solos estabilizados são influenciadas por diversos fatores, como por exemplo, o tipo de solo, qual o aditivo a ser incorporado, a quantidade de aditivo, as condições de colocação em obra, o grau de mistura e o tempo de cura. Estes aspectos são referidos realçando a informação relevante disponível na literatura (CRUZ, 2004).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo estão descritos os materiais e especificações utilizadas para a caracterização física do resíduo de mármore, do solo e da cal, além dos procedimentos adotados para a análise do comportamento mecânico do solo estabilizado com o resíduo e a cal, separadamente.

Para satisfazer os objetivos desta pesquisa foram considerados estudos prévios disponíveis na literatura. A partir destes foi possível dividir a programação experimental em duas etapas, sendo a primeira composta pela obtenção dos materiais seguidamente pelos ensaios de caracterização do solo coletado, da cal e do resíduo de mármore. Na segunda parte foram realizadas as confecções dos corpos de prova com o solo natural estabilizado com a cal e com o resíduo de mármore, separadamente, para a posteriori serem submetidos ao ensaio de resistência a compressão simples.

Os ensaios utilizados seguiram as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), American Standard Test Method (ASTM) e metodologias disponíveis na literatura.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para realização dos ensaios serão descritos a seguir juntamente com o local de onde foram adquiridos.

3.1.1 Solo

No desenvolvimento deste trabalho foi utilizado um solo expansivo oriundo do município de Paulista – PE, que se localiza no litoral norte pernambucano, sendo pertencente a Mesorregião Metropolitana do Recife. As amostras deformadas do solo foram extraídas de valas com dois metros de profundidade. As amostras foram coletadas conforme a ABNT NBR 9820 e transportadas para o LEP na UFCG.

Figura 4 - Vala em Paulista PE, Local onde foram coletadas as amostras do solo.



3.1.2 Resíduo de Mármore

Este material apresenta granulometria fina e possui cal em sua constituição (Figura 4). Devido a estas características e ampla disponibilidade, o resíduo de mármore foi avaliado como estabilizante e melhorador da resistência do solo. O resíduo de mármore foi coletado na marmoraria MC Mármore Campinense localizada no bairro do Catolé na cidade de Campina Grande-PB. O resíduo de mármore foi adicionado ao solo expansivo nos teores de 30%, 40% e 50% em peso, selecionados a partir do ensaio de consumo inicial de mármore (ICM) que será abordado no tópico 3.2.3.

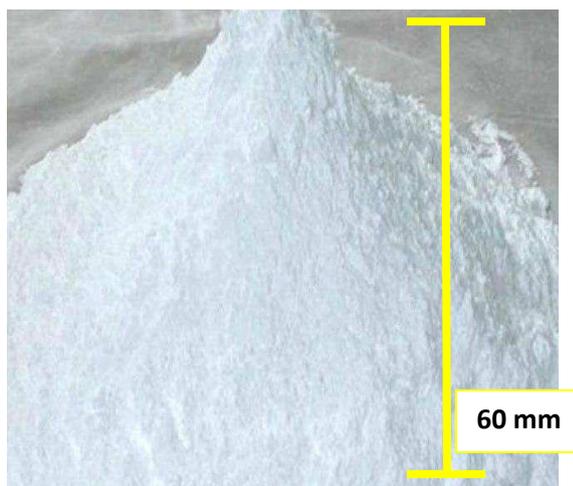
Figura 5 - Resíduo de Mármore.



3.1.3 Cal

O óxido de cálcio ou mistura de óxidos de cálcio e de magnésio, provenientes da calcinação do metal cálcio é conhecido como cal. Este material quando adicionado a qualquer tipo de solo, desde que o mesmo contenha minerais argilosos em qualquer proporção, ocorrerão as seguintes reações em presença de um teor adequado de umidade: troca de íons, floculação, reação cimentante pozolânica e carbonatação. Essas reações modificam algumas propriedades mecânicas do solo e devido a isto, este material foi utilizado nessa pesquisa e avaliado em termos de melhoramento da resistência a compressão do solo em estudo. A cal hidratada dolomítica utilizada (Figura 6) foi adquirida no comércio local de Campina Grande – PB e adicionada ao solo expansivo nos teores 4%, 6% e 8% em peso conforme o ensaio de consumo inicial de cal (ICL).

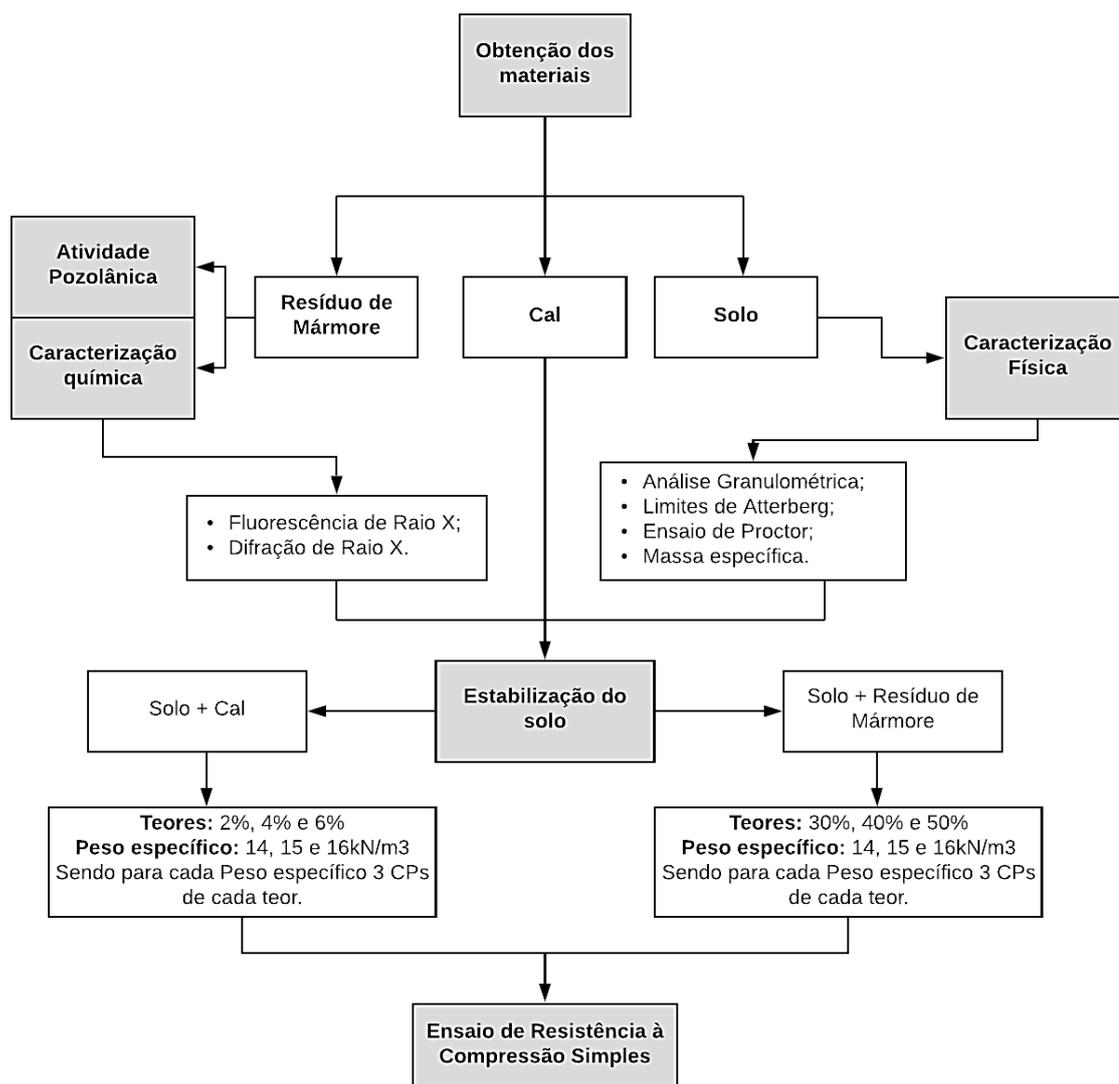
Figura 6 - Cal utilizada na pesquisa.



3.2 Métodos

Nessa pesquisa foram realizados ensaios de caracterização física do solo e caracterização química do resíduo, assim como ensaio de compressão simples para a análise da resistência mecânica do solo natural estabilizado com os aditivos propostos. O Fluxograma da Figura 7 apresenta a metodologia desenvolvida durante a pesquisa.

Figura 7 - Fluxograma das atividades de pesquisa.



3.2.1 Caracterização Física do Solo

Os ensaios que foram realizados para a caracterização do solo com suas respectivas normas técnicas estão listados na Tabela 2 a seguir.

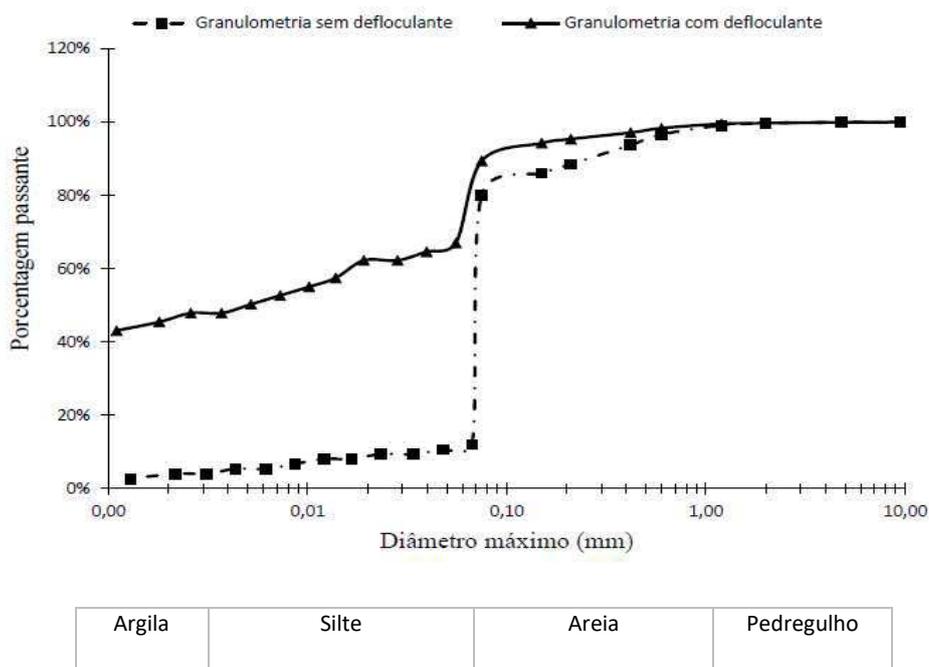
Tabela 2 - Ensaio de caracterização física do solo.

Ensaio	Norma
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181
Limites de Atterberg	ABNT NBR 6459 ABNT NBR 7180
Compactação Proctor	ABNT NBR 7182
Massa específica	ABNT NBR 6508

3.2.1.1 Análise granulométrica

Os ensaios de granulometria foram realizados com e sem o uso de defloculante. Neste procedimento o solo foi misturado e quarteado e logo após foi realizado o peneiramento em uma série-padrão de peneiras, com aberturas de malhas sequenciadas. A partir da análise granulométrica foi possível a construção da curva de distribuição granulométrica como indica a Figura 6.

Figura 8 - Curva granulométrica do solo



Na Figura 8 verifica-se uma variação na curva com e sem defloculante, isso indica que a distribuição dos tamanhos das partículas que o solo apresenta em campo não reflete a real condição dele, ou seja, esse fato pode levar a interpretações equivocadas das propriedades do solo.

De acordo com a distribuição granulométrica do tamanho dos grãos do solo, pode-se determinar que o solo é predominantemente fino. A Tabela 3 apresenta a composição do solo sem e com defloculante, respectivamente.

Tabela 3 - Composição do solo

	Areia	Silte	Argila
Composição do solo sem defloculante	19,84%	76,14%	4,02%
Composição do solo com defloculante	10,58%	43,96%	45,46%

3.2.1.2 Massa específica

A massa específica dos sólidos depende do tipo de mineral e da porcentagem de ocorrência de cada um deles no solo. O procedimento começa com uma preparação prévia da amostra que deve ficar em repouso por 12 horas com água destilada. Depois essa amostra é transferida para um picnômetro completando o volume de 250cm³. É realizada a retirada do ar do picnômetro. O ensaio consiste em se tomar a massa do conjunto picnômetro + água + solo.

Por meio desse procedimento foi obtida a massa específica do solo em estudo, sendo esta 26,50 KN/m³. De acordo com Jacintho et al. (2012) o valor da massa específica real do solo pode variar a depender do local, isto é, depende do tipo de rocha e do processo de intemperismo que originou a rocha, dessa forma, regiões de clima tropical, geralmente, apresentam solos com massa específica real dos grãos próxima de 30 KN/m³.

3.2.1.3 Limites de Consistência de Atterberg

Os limites de consistência são usados para separação dos estados de consistência de um solo fino ou a fração fina de um solo grosso, por meio de um teor de umidade limite entre esses estados, que são o estado sólido, semi-sólido, plástico e líquido. Esses são definidos pelos limites de contração, plasticidade e liquidez.

- Limite de liquidez: O ensaio consiste em colocar uma pasta formada pela amostra e água em uma concha fazendo uma ranhura nessa pasta. Esta concha é presa a uma manivela que gira a uma velocidade de 2 voltas por segundo, o conjunto desses equipamentos recebe o nome de aparelho de Casagrande. É anotado quantas voltas são necessárias para que a ranhura se feche e logo após, colhe-se uma amostra para checar o valor da umidade.
- Limite de plasticidade: esse teste envolve a confecção de um pequeno bastão de amostra para ser rolada em uma placa esmerilhada de vidro com a mão. O objetivo é chegar a um bastão de aproximadamente 3mm de diâmetro com início de formação de fissuras. Sendo essas duas características satisfeitas, tira-se uma amostra da parte fissurada para checagem da umidade.

A partir dos ensaios realizados foram obtidos os resultados indicados na Tabela 4. O índice de plasticidade confirmou a característica plástica do solo coesivo em estudo.

Tabela 4 - Limites de Atterberg

Limite de plasticidade (LP)	21%
Limite de liquidez (LL)	49%
Índice de plasticidade (IP)	28%

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.

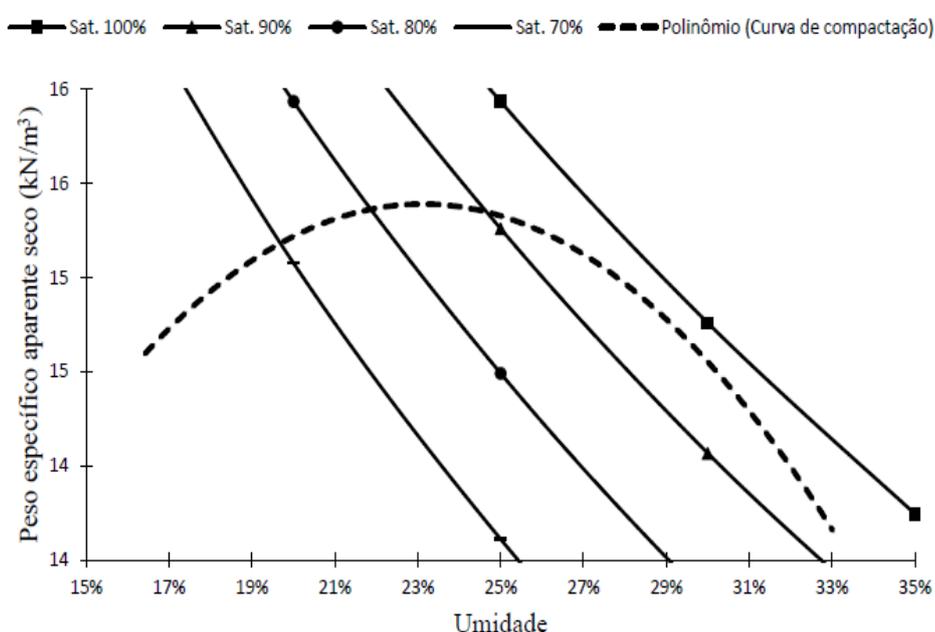
3.2.1.4 Compactação Proctor

O procedimento seguiu o preconizado pela ABNT NBR 7182, que consiste em compactar dinamicamente e com energia normal amostras do solo natural com adições crescentes de umidade, utilizando-se um molde cilíndrico padrão e um soquete. O solo foi adicionado em cinco camadas de igual altura no cilindro, as quais recebiam quantidades de golpes iguais e correspondente a energia de compactação normal empregada. Ao final da

compactação, os corpos de prova foram pesados e colhido amostras para verificação da umidade.

Com esses dados consegue-se traçar a curva de variação da massa específica seca em função do teor de umidade. Desse procedimento será possível obter a umidade ótima de compactação que fornece a maior massa específica seca. A Figura 9 indica a curva de compactação do solo expansivo estudado.

Figura 9 - Curva de compactação



O solo em estudo apresentou umidade ótima de 23% e densidade seca máxima de 15,4 kN/m³. A umidade ótima elevada é uma característica de solos coesivos, bem como a densidade máxima entre 15 kN/m³ e 16 kN/m³ e forma da curva.

3.2.2 Atividade pozolânica

A ABNT NBR 5751 (2012) foi a norma utilizada para a análise da atividade pozolânica da mistura. O índice de atividade pozolânica é o resultado médio obtido do ensaio de compressão simples de corpos de prova de argamassa com adição de pozolana. Este ensaio foi realizado com cal a fim de verificar se o resíduo de mármore apresentaria alguma reatividade. Foram moldados três corpos de prova, compostos de areia, resíduo de mármore, cal e água. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5 - Atividade pozolânica do resíduo de mármore

CP	q _u
1	0.15 Mpa
2	0.16 Mpa
3	0.17 Mpa
Média	0.16 Mpa

A partir da análise dos dados apresentados é possível observar que o resíduo de mármore não apresenta atividade pozolânica pois segundo a NBR 12653 (1992) para que um material possa ser classificado como material pozolânico a resistência a compressão simples deve ser maior ou igual a 6 MPa.

3.2.3 Composição química do resíduo de mármore

A caracterização química do resíduo de mármore foi realizada a partir dos ensaios de fluorescência de raio x e difração de raio x.

O ensaio de fluorescência de raio x foi executado a partir da atmosfera de vácuo e foi utilizado catodos de cobre, o resultado desse ensaio é apresentado na Tabela 6. A partir deste foi possível identificar os principais elementos químicos presentes no resíduo de mármore, sendo eles dióxido de silício (SiO₂), óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO).

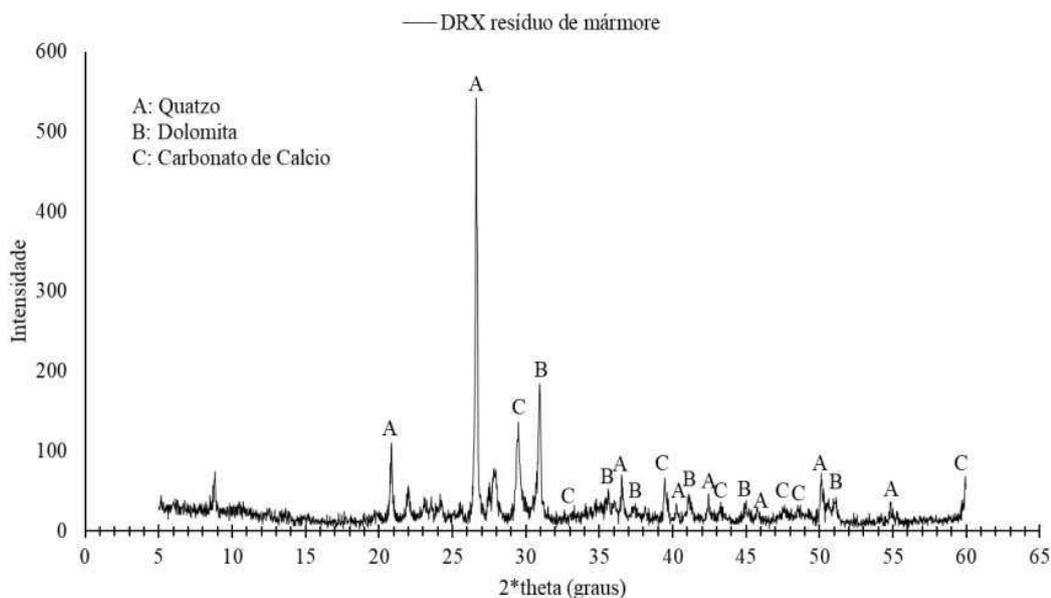
Tabela 6 - Composição química do resíduo de mármore – Fluorescência de raio x

Elemento (%)	Fração (%)
SiO ₂	39.36
CaO	13.82
MgO	12.01
Al ₂ O ₃	8.42
Fe ₂ O ₃	2.71
K ₂ O	1.46
TiO ₂	0.44
SO ₃	0.20
BaO	0.16
MnO	0.06
SrO	0.01
PR	21.35

PR: perda ao rubro

A difração de raio-x do resíduo de mármore está apresentada na Figura 10. Este ensaio foi realizado com uma amplitude de 5° a 60° e velocidade de varredura foi de 2° por minuto em equipamento com catodo de cobre, diferença de potencial de 40 kV e corrente de 30 mA. A DRX indicou picos de quartzo, dolomita e carbonato de cálcio, corroborando com os óxidos identificados pela fluorescência de raio x.

Figura 10 - Difração de raio x do resíduo de mármore



Os elevados teores de óxido de silício indicam que grande parte desse material advém de rochas graníticas. Assim, a partir dos ensaios de fluorescência e difração de raio x é possível perceber que o resíduo utilizado nesta pesquisa não é composto apenas por mármore, mas sim por mármore e outras rochas ornamentais como granitos.

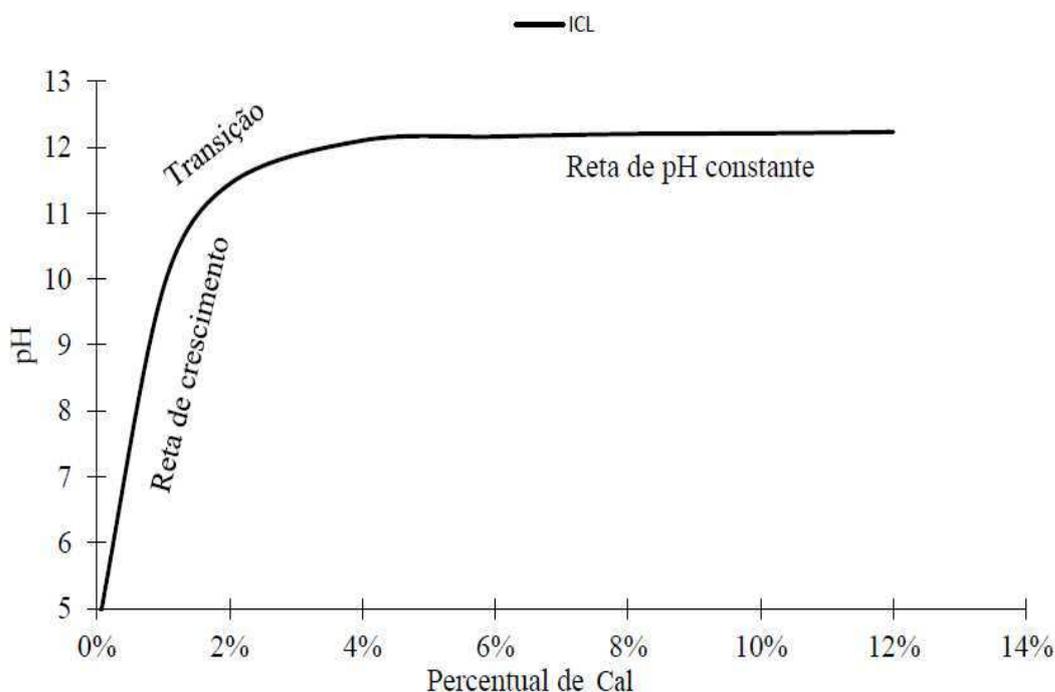
3.2.4 Estabilização do solo

A estabilização química do solo estudado foi realizada a partir da modificação deste com a cal e com o resíduo de mármore a fim de analisar a respeito da influência dos estabilizantes na resistência à compressão simples do solo. Para cada estabilizante foram escolhidas as variáveis fixadas, que foram o tipo de solo, o tipo de aditivo e a umidade de compactação, e as variáveis investigadas que foram elas, os teores de cal e resíduo de mármore e o peso específico do solo a fim de encontrar respostas sobre a participação dessas nas reações da mistura.

A escolha dos teores de cal e de resíduo estudados foi realizada com base no ensaio de consumo inicial de cal (ICL) e consumo inicial de mármore (ICM). O ensaio de ICL foi originalmente desenvolvido para solos estabilizados com cal, mas para definir os teores de resíduo de mármore foi realizado o mesmo ensaio substituindo-se a cal pelo resíduo de mármore. Este ensaio consiste em adicionar cal ao solo até obter-se um pH constante. O teor de cal no qual o pH estabiliza é entendido como o teor mínimo de cal para se estabilizar o solo (SAMANIEGO, 2015). Segundo Tenório (2019) a reta de crescimento indica a parte da curva em que o crescimento do pH é acentuado para pequenos teores adicionados, a reta de pH constante indica o trecho em que há pouca variação do pH, por fim a transição indica o trecho em que ocorre a mudança entre um crescimento acentuado do pH para um pH constante.

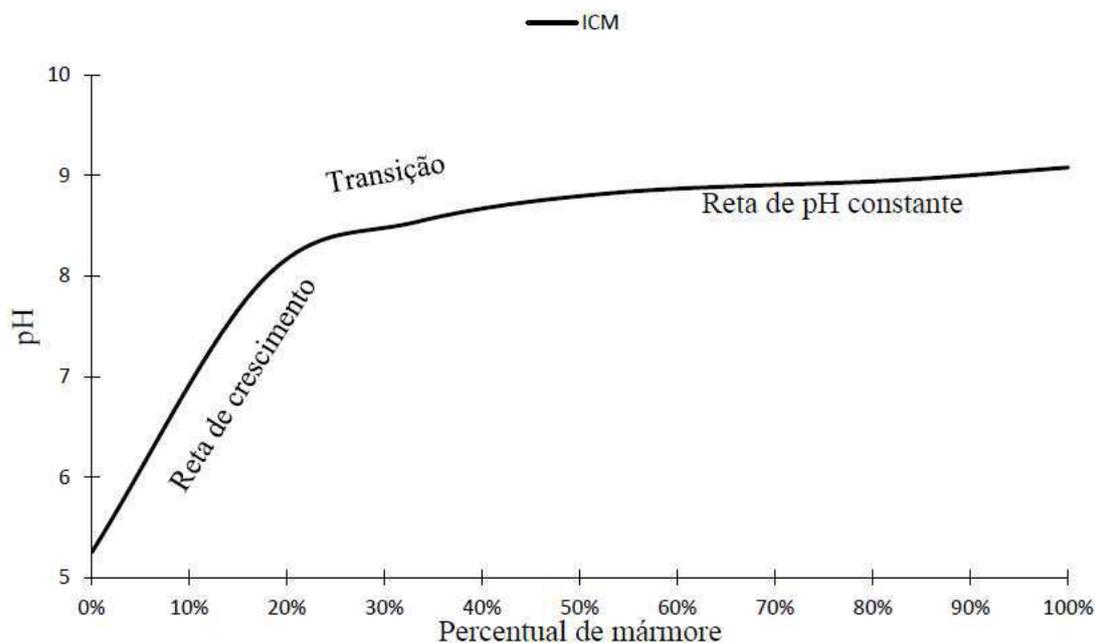
A partir do ICL, indicado na Figura 11, foi obtido pH constante para o teor de 6%. Desta forma, em teores maiores ou iguais a 6% a expansão do solo deve ser próxima a zero.

Figura 11 – ICL entre solo expansivo e cal.



Como indica a Figura 12, a partir do ICM foi definido o pH constante, onde as reações de floculação foram efetivadas. Logo, para teores maiores que o teor de pH constante, 50%, a expansão do solo deve ser mínima.

Figura 12 – ICM entre solo expansivo e resíduo de mármore



Os pesos específicos secos foram escolhidos com base na curva de compactação do ensaio proctor com energia normal, a partir do peso específico máximo, moldou-se corpos de prova com valores em torno deste, como indicado na Figura 7. Também foi considerada a premissa de promover a variação da porosidade, por meio da variação do peso específico seco.

A umidade foi definida com base na curva de compactação e na premissa de assegurar uma amplitude de expansão passível de ser mensurada. Portanto, na umidade de 19% a saturação dos corpos de prova varia entre 50% e 75%, com isso assegurou-se que os corpos de prova têm um nível de expansão mensurável (TENÓRIO, 2019).

As Tabelas 7 e 8 indicam respectivamente as variáveis fixadas e as variáveis investigadas desse estudo.

Tabela 7 - Variáveis fixadas

Variável	Unidade	Nível
Tipo de solo	-	Argila Expansiva
Tipo de aditivo	-	Cal hidratada Resíduo de mármore
Umidade	%	19 % (+/- 0,5%)
Tempo de cura	dias	28

Tabela 8 - Variáveis investigadas

Variável	Unidade	Níveis
Teor de cal	%	4, 6 e 8
Teor de mármore	%	30, 40 e 50
Peso específico seco aparente	kN/m ³	16, 15, 14 (99% a 101%)

Desta forma, a variável de resposta trata-se da resistência mecânica do solo em função das variáveis fixadas e das variáveis controladas, a fim de avaliar o acréscimo de resistência a compressão simples em decorrência do teor de resíduo de mármore adicionado ao solo e da densidade.

3.2.4.1 Dosagem e moldagem dos corpos de prova estabilizados

A partir da definição das variáveis investigadas foram realizados os cálculos para dosagem das misturas, na qual foi necessário fixar o valor do peso específico seco aparente desejado, as dimensões do corpo de prova e a umidade desejada, sendo conhecida também a umidade hidrocópica do solo, possibilitando obter a quantidade ideal de cada material a ser utilizado na mistura.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram confeccionados 27 corpos de prova cilíndricos para cada tipo de aditivo, totalizando 54 corpos de prova, moldados através da compactação estática com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A mistura dos materiais foi realizada de forma manual, antes e depois da adição de água. A compactação se deu com o uso do molde (Figura 13) e da prensa (Figura 14) realizando a divisão da mistura em 3 camadas de igual massa e escarificando entre elas para o aumento da aderência.

Figura 13 - Molde de aço



Figura 14 - Prensa de moldagem



O procedimento de compactação consistiu em montar o molde, inserir papel filtro no seu interior para em seguida adicionar a mistura e por fim compactá-la na prensa. Após o procedimento, os corpos de prova foram embalados com filme plástico, armazenados em sacos plásticos com suas devidas identificações e deixados curar por 28 dias em caixas térmicas.

3.2.5 *Ensaio de Resistência à Compressão Simples*

O ensaio de resistência mecânica, que para esse estudo foi o de resistência à compressão simples, foi realizado a partir da confecção de corpos de prova. Os procedimentos foram realizados de acordo com a norma NBR 12770 que aborda a metodologia dos ensaios para solos. Esse ensaio tem sido bastante utilizado na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando o objetivo é verificar a efetividade da resistência em solos tratados. Além disso é de simples e rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido no meio técnico.

Após a cura por 28 dias, os corpos de prova estabilizados com cal e com o resíduo de mármore foram imersos em água por 24 horas antecedentes ao ensaio de compressão simples, para garantir minimização da sucção. Durante a etapa da saturação os três primeiros corpos de prova do solo-resíduo de mármore não resistiram e romperam totalmente ou parcialmente, indicando que o resíduo de mármore não foi capaz de conter

a expansão do solo, assim, as amostras seguintes ensaiadas não foram imersas em água antes do ensaio de resistência à compressão.

Para o ensaio de resistência à compressão simples foi utilizada uma prensa automática da SHIMADZU AG-IS (Figura 15) com velocidade de 1% por minuto.

Figura 15 - Prensa mecânica



4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes ao ensaio de resistência à compressão simples dos corpos de prova com solo estabilizado com cal e com resíduo de mármore. Posteriormente será realizada uma comparação dos resultados de resistência à compressão simples referente aos estabilizantes estudados.

4.1 Ensaio de Compressão Simples em Solo Estabilizado com Cal

Como descrito na metodologia, o ensaio de resistência à compressão simples foi realizado com corpos de prova estabilizados com teores de 4%, 6% e 8% de cal e pesos específicos de 14, 15 e 16kN/m³. Na Figura 16 estão ilustradas as curvas de resistência a compressão simples pelo teor de cal (Tc) com cura de 28 dias. O resultado do ensaio mecânico para cada teor com o mesmo peso específico corresponde à média obtida a partir do ensaio com três corpos de prova para cada conjunto.

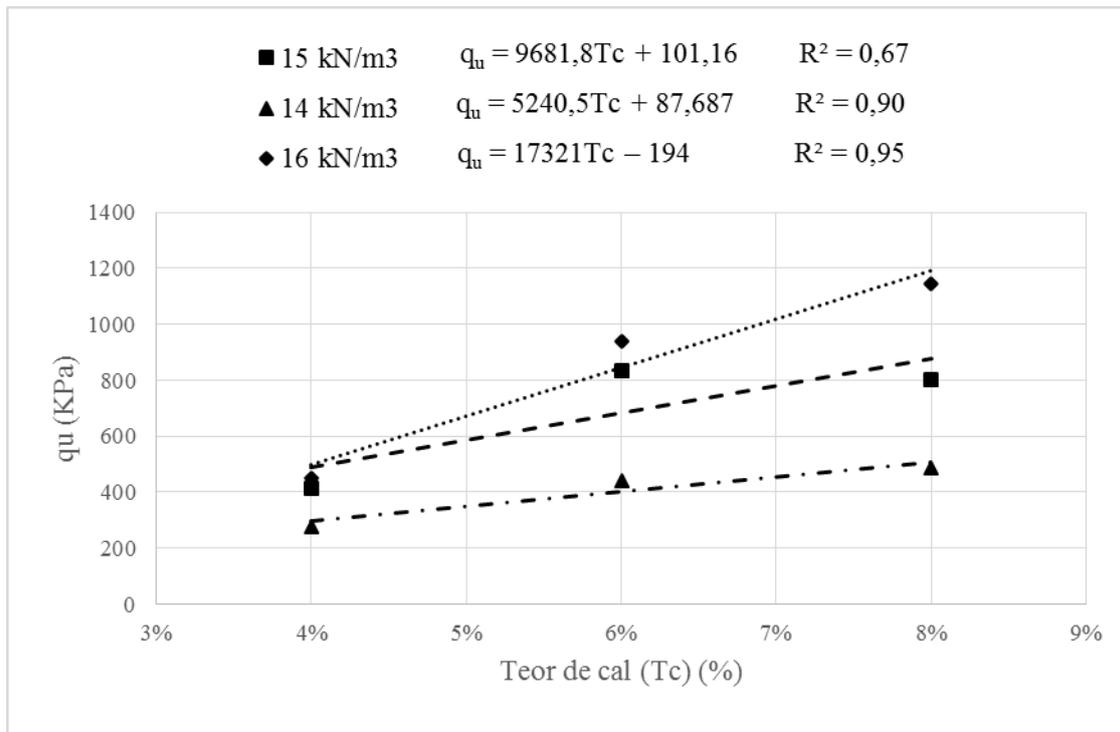
A partir da análise do gráfico é possível perceber que há um aumento da resistência conforme o aumento do teor de cal para os CPS compactados com o mesmo peso específico e também que as curvas tendem a se aproximar para menores teores de cal. A inclinação da curva de ajuste representa a taxa de crescimento da resistência a compressão simples, variando em cada curva e constante numa mesma curva. Desta forma, é possível observar que com o acréscimo do peso específico seco, a taxa de crescimento da curva de ajuste aumenta. Tal fato pode ser justificado tendo em vista que quanto maior a compactação, menor será a porosidade, resultando em menos vazios a serem preenchidos com gel oriundo das reações entre a cal e os argilominerais do solo, consequentemente maior será a resistência a compressão simples.

Observa-se nas curvas apresentadas que a representatividade dos resultados se torna maior quanto maiores os valores de peso específico do material ensaiado.

Tenório (2019) explica que os corpos de prova com menor teor de cal e massa específica mais baixa apresentam ruptura precoce devido o teor inserido não ser suficiente para conter as tensões de expansão nos corpos de prova. Por terem menor densidade estes não desenvolveram uma tensão de expansão forte o bastante para vencer as tensões estabilizadoras oriundas da estabilização do solo com cal.

Dessa forma, sendo os CPS mais representativos do efeito da adição da cal, aqueles cujo o valor do peso específico era maior para um mesmo teor de cal adicionada.

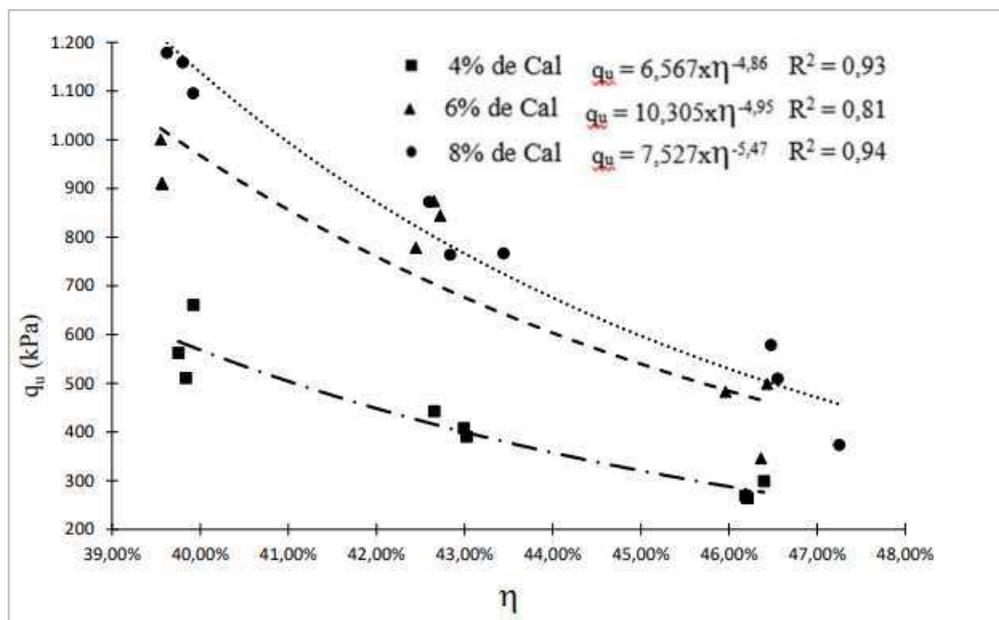
Figura 16 - Resistência à compressão dos corpos de prova com adição de cal.



Na Figura 17 estão ilustradas as curvas que relacionam a variação de resistência à compressão simples com a porosidade, com cada conjunto de dados relacionado utilizando o mesmo teor de cal.

Dentre os teores de 4%, 6% e 8%, verificou-se que os conjuntos de 6% e 8% apresentaram resultados mais próximos entre si; o que segundo Tenório (2019) pode ser explicado pela expansividade do solo, sendo possível que nesses teores as tensões devido à expansão sejam menos expressivas. Ainda da Figura 17 é possível verificar que a taxa com que a resistência a compressão simples aumenta é inversamente proporcional a porosidade. Lopes Jr (2011) explica que a redução da porosidade intensifica os contatos entre as partículas de argila e de cal tornando a cimentação mais eficiente e, portanto, aumentando a resistência a compressão simples.

Figura 17 - Resistência a compressão simples versus porosidade do solo estabilizado com cal.



Fonte: TENÓRIO (2019)

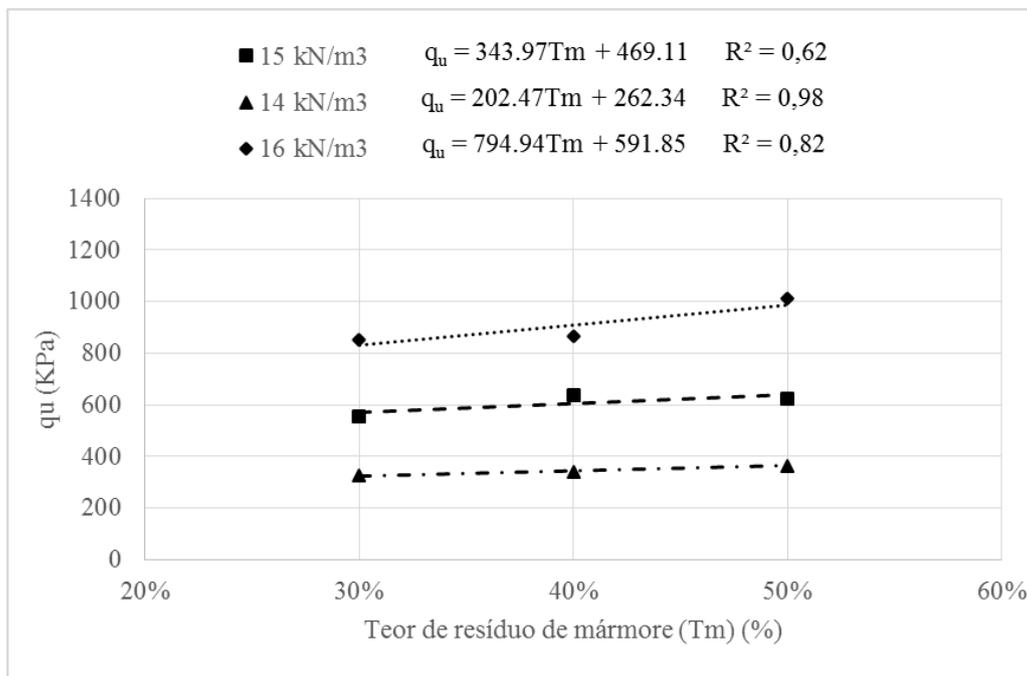
4.2 Ensaio de Resistência à compressão simples do solo estabilizado com resíduo de mármore

Como explicado no tópico 3.2.5, os corpos de prova que tiveram o solo estabilizado com resíduo de mármore, não resistiram ao processo de inundação. Este comportamento do solo indicou que não houveram reações pozolânicas entre o resíduo de mármore e o solo ou estas não foram suficientes para conter a expansão do solo, confirmando o que fora observado no resultado do ensaio atividade pozolânica, indicando que o resíduo de mármore se comporta como material inerte nas proporções estudadas.

Todavia é importante destacar que o material estudado é composto de outras rochas ornamentais como granito, como foi observado no ensaio de caracterização química do resíduo, o que pode influenciar no comportamento desse material.

Ainda assim, foram moldados os corpos de prova para analisar a influência do resíduo na resistência mecânica do solo em questão. A Figura 18 apresenta o resultado do ensaio, obtido a partir da média da resistência à compressão de três corpos de prova moldados com a mesma configuração, teor e peso específico seco.

Figura 18 - Resistência à compressão simples do solo estabilizado com resíduo de mármore



A análise do gráfico permite observar que as curvas apresentaram uma taxa de crescimento baixa, isto é, o aumento do teor de resíduo não teve grande influência na resistência mecânica do solo. Todavia, o aumento do peso específico produziu efeito na resistência, uma vez que a taxa de crescimento das curvas aumentou com o aumento do peso específico do solo, indicando a compactação do solo exerceu influência na RCS do solo estabilizado com mármore.

Observa-se também que o coeficiente de determinação R^2 está melhor representado para os solos com peso específico de 14kN/m³, indicando que esta curva é mais representativa dos valores ensaiados que as demais.

Com isso, pode-se dizer que o aumento do peso específico do solo somado ao aumento do teor de resíduo na estabilização deste, confere um ganho de resistência no solo expansivo estudado.

4.3 Análise da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação

Realizados os ensaios de resistência à compressão simples com os corpos de prova contendo adição de cal e de resíduo de mármore foi possível obter o cálculo das médias,

dos desvios padrão e dos coeficientes de variação para cada um dos teores adicionados para ambos os aditivos.

Na Tabela 9 estão descritos os valores obtidos para cada um dos aditivos e seus respectivos teores.

Tabela 9 - Valores da média, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados analisados.

Resíduo	Desvio Padrão	Média	Coeficiente de variação
4% Cal	91,55	380,72	24%
6% Cal	261,96	738,9	35%
8% Cal	328,77	810,63	40%
30% RM	264,38	577,88	46%
40% RM	263,75	614,67	43%
50% RM	325,02	667,30	49%

Realizada a análise dos dados é possível observar que o aumento do teor de cal adicionada ao solo proporcionou uma elevação no valor médio da resistência à compressão simples do solo em estudo; o desvio padrão representa o grau de dispersão do conjunto de dados, indicando o quanto um conjunto de dados é uniforme, dessa forma, verifica-se que o aumento do teor de cal aumentou também a dispersão dos dados tornando-os mais distintos entre si, fato que justifica-se pela diferença de peso específico dos corpos de prova avaliados.

Levando em conta que os corpos de prova tinham o mesmo teor de cal, mas pesos específicos distintos, entende-se que com o aumento do teor de cal modifica-se também a influência que a variação de peso específico representa para o solo estudado. Os valores elevados de desvio padrão indicam que os valores obtidos estão dispersos da média. Os valores do coeficiente de variação por outro lado confirmam que o teor de 4% de cal fornece valores mais homogêneos de resistência, ou seja, mesmo variando o peso específico a influência na resistência é menos significativa.

Nesse mesmo sentido, a análise realizada com os resultados obtidos dos corpos de prova adicionados de resíduo de mármore mostra que o aumento do teor de resíduo inserido não altera tão significativamente o valor médio de resistência à compressão simples dos corpos de prova ensaiados. Verifica-se ainda que para os teores de 30% e

40% o desvio padrão foi muito aproximado, indicando que a influência desses teores é semelhante, ou seja, a variação de apenas 10% do teor de resíduo não foi significativa para a modificação da resistência dos corpos de prova.

Observa-se ainda que os valores de desvio padrão, assim como nos corpos de prova modificados por cal, são elevados, indicando que há uma dispersão dos dados e um distanciamento do valor médio entre os valores, o que também se justifica pela variação dos valores dos pesos específicos. Embora o coeficiente de variação para os três teores tenha sido semelhante, todos eles indicam que os valores variam de forma não homogênea, ou seja, a variação dos teores exerce influência nos valores de resistência obtida, indicando que maiores teores de resíduo proporcionam maiores valores de resistência, para pesos específicos distintos.

4.4 Análise comparativa Cal x Resíduo de Mármore para melhoria da Resistência mecânica do solo

A partir dos resultados dos ensaios de Resistência à compressão simples foi possível observar que a cal exerce influência significativa na melhoria da resistência mecânica do solo, ampliando os valores aos quais os corpos de prova resistem; enquanto o resíduo de mármore apresenta pouca ou quase nenhuma influência.

A cal reage de forma positiva com o solo, possibilitando um aumento na resistência à compressão devido as reações entre os argilominerais presentes no solo e o material inserido. Já o resíduo de mármore apresenta-se praticamente inerte, não reagindo com as partículas de solo.

Por meio da estabilização do solo expansivo com cal e com resíduo de mármore foi possível perceber que a interação da cal com o solo promove reações pozolânicas pelas quais foi possível obter a contenção do solo quando esse esteve em câmara úmida. O que não ocorreu com a estabilização com o resíduo, pois os resultados indicaram que a interação do material com o solo não promove esse tipo de reação.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993) a presença da sucção é um dos principais fatores de alteração do comportamento geomecânico dos solos residuais, uma vez que podem causar a estabilização de um talude natural a partir de um aumento na resistência

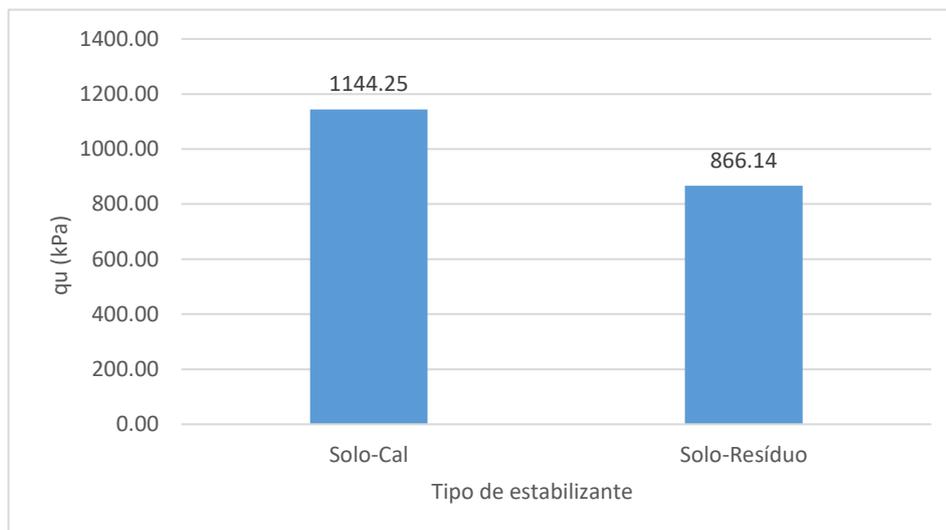
do solo, ou pode inversamente instabilizá-lo causando uma diminuição na sua resistência quando esse é saturado.

Logo, como os corpos de prova solo-resíduo não resistiram a cura úmida resultou em uma diferença no processo metodológico quando comparado aos corpos de provas solo-cal que passaram por esse processo antes de serem rompidos. Esse fato pode influenciar nos resultados da resistência mecânica do solo-resíduo, uma vez que não foi garantida a amenização dos efeitos de sucção no solo, ou seja, a presença de pressão negativa nos poros não foi anulada.

A análise dos resultados permite observar que o aumento do teor na estabilização do solo com cal exerceu influência significativa na resistência mecânica. Na estabilização com o resíduo de mármore, com exceção da curva com peso específico de 16 KN/m^3 , as curvas apresentaram-se quase que constante, indicando que o aumento do teor não exerceu grande influência na RCS do solo estabilizado.

A Figura 19 expõe um comparativo dos resultados da RCS entre os corpos de prova ensaiados com adição de cal e os corpos de prova com adição do resíduo, fixando-se o valor do peso específico aparente seco de 16 KN/m^3 que foi o de melhor performance nos ensaios e sendo os teores de cada aditivo os maiores entre as trincas, ou seja, 8% de cal e 50% de resíduo. Com isso é possível perceber a diferença no valor do q_u de $278,11 \text{ KPa}$ entre os tipos de estabilizantes. A maior resistência à compressão simples alcançada pela adição de cal deve-se a característica expansiva do solo, pois dentre os elementos estudados, a cal é a única capaz de resolver quimicamente o problema da expansividade do solo, por meio das trocas catiônicas.

Figura 19 - Comparativo entre o solo-cal e o solo-resíduo, sendo $\gamma_d=16kN/m^3$ e teores de 8% e 50%, respectivamente.



Apesar da estabilização com os dois materiais tenha passado por um processo diferente na fase de cura, pode-se observar que assim como a estabilização com cal, a estabilização com resíduo proporcionou ganho de resistência ao solo por meio do aumento do teor em conjunto com o aumento do peso específico, indicando que é possível obter o melhoramento do solo a partir do uso desse estabilizante, apesar desse apresentar desempenho menor comparado à cal.

5 CONCLUSÃO

A estabilização de solos expansivos é uma alternativa para conferir maior resistência e desempenho desses nas obras de engenharia. Se faz importante a análise do material que irá proporcionar maior resistência diante das condições fixadas bem como a relevância do uso desse aditivo como estabilizante tendo em vista questões técnicas e sustentáveis.

A adição da cal no solo proporcionou uma melhoria na resistência à compressão simples e ainda auxiliou no controle da expansão do solo, ampliando dessa forma as possibilidades de aplicação do solo após melhoramento em teores adequados.

O estudo do resíduo de mármore como material para estabilização de solos expansivos permitiu concluir que o material utilizado não promove reações pozolânicas consideradas importantes na contenção da expansão de solos argilosos. Entretanto foi possível perceber que além do mármore, esse material contém outras rochas ornamentais, sendo necessário a coleta específica do resíduo do mármore para que se pudesse estudar a respeito da atividade pozolânica desse aditivo.

O ensaio de resistência à compressão simples do solo estabilizado com resíduo de mármore indicou aumento da resistência mecânica a partir do aumento do teor de resíduo associado ao aumento do peso específico do solo, indicando que a compactação exerceu influência na RCS do solo estabilizado, tendo em vista menor volume de vazios e queda da porosidade dos corpos de prova em estudo.

Dessa forma, é possível concluir que o resíduo utilizado para estabilização do solo expansivo composto de rochas ornamentais não apresentou desempenho superior comparado à estabilização com cal, todavia promoveu melhoria do comportamento mecânico do solo expansivo, podendo ser utilizado no melhoramento de solos tendo em vista a importância do descarte adequado desse tipo de material do ponto de vista sustentável.

Além disso, o resíduo surge como uma boa proposta para a adição em solos não expansíveis cujo o objetivo seja apenas de melhorar a RCS, contribuindo também para uma redução dos impactos causados por esse tipo de material no meio ambiente, haja vista que a quantidade volumétrica de resíduo a ser adicionada ao solo é bastante alta

quando comparada aos outros tipos de aditivos para se alcançar o objetivo proposto, diminuindo gradativamente a deposição incorreta desse em outros locais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKINWUMI, I. I.; BOOTH, C. A. Experimental insights of using waste marble fines to modify the geotechnical properties of a lateritic soil. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, v. 23, n. 2, p. 121–128, 2015.
- ALMEIDA, G. B. DE O. Avaliação da Resistência à Compressão Simples de Misturas de.pdf. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016.
- ALMEIDA, Thiago; LEITE, Flaviane; HOLANDA, José (2015) - Caracterização de Resíduos de Pó de Mármore para aplicação em materiais cerâmicos In I Encontro de Engenharia, Ciência de Materiais e Inovação do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Nova Friburgo: 2014.
- ALYAMAÇ, K.E.; TUĞRUL, E. A Durable, Eco-Friendly and Aesthetic Concrete Work: Marble Concrete. 11th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2014), 50, 21-25 October 2014, İstanbul, Turkey.
- APOLINÁRIO, E.A.; SANTOS, G.R. S.; RIBEIRO, D. V. Efeitos da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades das argamassas de cimento portland e industrializada no estado aplicado. IX Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 9, n. 1, p. 123-140, 2013.
- ARAUJO, A. F. (2009). Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia do Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 175 fl.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. Geologia de Engenharia. 1. ed. São Paulo: Oficina dos textos, 1998
- AZEVEDO, André Luis Cairo de. Estabilização de solos com adição de cal: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 2010.
- BALKIS, A. P. The effects of waste marble dust and po...roperties of gypsum stabilized earthen. *Construction and Building Materials*, v. 134, p. 559–562, 2017.
- BAPTISTA, C. F. N. (1976) Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis. Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre, RS.
- BERTOSSI, A. P. A., CARDOSO, M. D. S. N., PRADO, A. C. D. A., POLIDORO, J. C., Garcia, G. D. O., & Neves, M. A. (2011). Influência de resíduo de serragem de mármore na condutividade hidráulica do solo e na qualidade da água. *Revista de Ciências Agrárias*, 34(1), 123-134.
- 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. ISSN:2448-0959
- CHAITANYA, J. Y.; AMMINEDU, E. Investigation of Soil Stabilization using Waste Fiber Materials. p. 1–7, 2017.

CHAO-LUNG, H.; ANH-TUAN, B. L.; CHUN-TSUN, C. Effect of marble dust on strength and durability of Rice husk ash stabilised expansive soil. *Construction and building materials*, v. 25, n. 9, p. 3768– 3772, 2011.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 001, de 23 de setembro de 1986. Define impacto ambiental. Disponível em:. Acesso em: 31/07/2018

CORDEIRO, Fernanda et al. ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO DE BAIXA RESISTÊNCIA DA REGIÃO DE CONCÓRDIA-SC, ESTABILIZADO COM TRÊS TEORES DE CAL. Seminário de Iniciação Científica, Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão e Mostra Universitária, 2016.

CRUZ, MARIA (2004) - Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento. Braga: Universidade do Minho. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil

DESTEFANI, A. Z. Utilização do planejamento experimental na adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais para produção de blocos prensados de encaixe. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 2009

DIAS, João José da Fonseca Marques et al. Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas. 2012. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

FERRAZ, R.L. (1994) Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais. Viçosa, UFV. 174p. (Tese de MS).

FERREIRA, M. C.; THOMÉ, A. Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais. *Teoria e Prática na Engenharia*, Passo Fundo, n.18, p. 1-12, nov. 2011.

FREDLUND, D.G. AND RAHARDJO, H. (1993) *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley and Sons, New York.

GERMANO, David [et al.] (2013) - O Impacte das Pedreiras Inactivas na Fauna, Flora e Vegetação da Zona dos Mármore: Problema ou Benefício? *Callipole - Revista de Cultura* nº21

GONDIM, L. M. (2008) Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 213 fl.

GUIMARÃES, J. E. P. (1971) Estabilização de Solos com Cal. ABPC, São Paulo, SP, Boletim nº 5, 68p.

GUIMARÃES, J. E. P. “Nova e importante aplicação da cal. Seus conceitos e vantagens”. São Paulo, 1971. Associação Brasileira dos Produtores de Cal, Boletim nº 01, 68p

HUAT, B. K. et al. Utilization of Alkali-Activated Olivine in Soil Stabilization and the Effect of Carbonation on Unconfined Compressive Strength and Microstructure. v. 29, n. 6, p. 1–11, 2017.

INTERNATIONAL FOCUS GROUP ON RURAL ROAD ENGINEERING (2005). Cement and Lime Stabilisation. Net, fev.; 2005.

JACINTHO, E. D.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CARDOSO, F. B. F.; GUIMARÃES, R. C. (2012). Perfil de intemperismo e infiltração. In: Tópico sobre infiltração: teorias e práticas aplicadas a solos tropicais. Série Geotecnia, Universidade de Brasília, v.4. 2012.

KUSHWAH, S. S.; GUPTA, S. EFFECT OF MARBLE SLURRY DUST AND LIME STABILIZATION ON GEOTECHNICAL PROPERTIES OF FINE SAND. International Journal of research in Engineering and Technology, n. 2011, p. 62–72, 2017.

LATIFI, N. et al. Tropical residual soil stabilization : A powder form material for increasing soil strength. Construction and Building Materials, v. 147, p. 827–836, 2017

LOPES JR., L. da S. Metodologia De Previsão Do Comportamento Mecânico De Solos Tratados Com Cal. 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

MACHADO, Roberto Gonzaga Fernandes (2012) - Incorporação de lamas de pedra em argamassas - Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil Braga: UMinho.

MAKUSA, G. P. Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review. Sweden: Lulea University of Technology, 2013.

MAKUSA, G. P. Soil stabilization methods and materials: State of the art review, 2012.

MARQUES, Nuno; BRANCO, Fernando; DOS SANTOS, Roberto. Impactes Ambientais das Lamas de Rochas Ornamentais. Lisboa, 2005

MEDINA, J., (1987) – Apostila de estabilização de solos – COPPE/UFRJ.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., Apostila de estabilização de solos. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MOURA, Washington A.; GONÇALVES, Jardel P.; LEITE, Roneison da Silva. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. Sitientibus, v. 26, n. 1, 2002.

NITES-Núcleo Regional de Informação Tecnológica do Espírito Santo, “Desperdício na Indústria de Mármore e Granito. Rochas de Qualidade”, Ed.118 (Jul-Ago-Set 1994).

OKAGBUE, C. O.; ONYEOBI, T. U. S. Potential of marble dust to stabilise red tropical soils for road construction. Engineering Geology, v. 53, n. 3–4, p. 371–380, 1999.

OLIVEIRA, E. DE. Emprego Da Cal Na Estabilização De Solos Finos De Baixa Resistência E Alta Expansão: Estudo De Caso No Município De Ribeirão Das Neves/Mg. [s.l: s.n.].

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, Florianópolis, 2010.

PEREIRA, F.R. (2006) - Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentícias. Tese de doutoramento. Aveiro, Universidade de Aveiro, Portugal.

POURAKBAR, S. et al. 2015- `Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement.pdf. Transportation Geotechnics, v. 3, p. 24–25, 2015.

RAYMUNDO, Valério. Use of marble cutting waste of Espírito Santo State as corrective of soil acidity. 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia; Recursos Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2008.

SAMANIEGO, R. Al. Q. Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal. 2015. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B., “Estabilização dos solos com cal e betume”. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, pp.74 – 97, Santos – São Paulo, Abril, 1995.

SILVA LORA, Electo Eduardo. Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte. Rio de Janeiro, 2002.

SILVA, J. B., HOTZA, D., SEGADÃES, A. M., & ACCHAR, W. (2005). Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas (Incorporation of marble and granite sludge in clay materials). *Cerâmica*, 51(320), 325-330.

TASAICO, DEO. Desenvolvimento de processos compactos para o tratamento de águas residuárias da indústria de mármore e granito. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.

TENÓRIO, Eduardo Antonio Guimarães et al. Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

VILLALBA KANAZAWA, N. M. Durabilidade, Rigidez e Avaliação do Ciclo de Vida de um Solo.pdf. [s.l: s.n.].