

## AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM SOLO DO MUNICÍPIO DE PAULISTA-PE ESTABILIZADO COM CIMENTO PORTLAND E RESÍDUO DO POLIMENTO DE MÁRMORE

Raabi Inarair Ferreira Braz<sup>1</sup>  
Flávio Marcell dos Santos Lucena<sup>2</sup>  
Paula Almeida Aguiar<sup>3</sup>  
Carina Silvani<sup>4</sup>

### RESUMO

O seguinte trabalho aborda o método de estabilização de solos feito com estabilizantes químicos. Essa técnica baseia-se em adicionar ao solo que não possui as características e propriedades adequadas para uso na construção civil, no intuito de melhorá-lo. Dentre os estabilizantes mais usados tem-se o cimento que ao ser incorporado ao solo resulta em melhores valores de resistência e rigidez. Entretanto, há na atual conjuntura ambiental 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/m<sup>3</sup>, 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 também se mostraram mais favoráveis à cal.

**Palavras-chave:** rochas ornamentais, cimento Portland, solo expansivo, estabilização de solo.

<sup>1</sup> Graduada do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, [raabifb@gmail.com](mailto:raabifb@gmail.com);

<sup>2</sup> Graduado pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, [flaviolucna@gmail.com](mailto:flaviolucna@gmail.com);

<sup>3</sup> Graduada do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, [almeidaaguiarpaula@gmail.com](mailto:almeidaaguiarpaula@gmail.com);

<sup>4</sup> Professor orientador: Doutora, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, [carinasilvani@hotmail.com](mailto:carinasilvani@hotmail.com), (83) 3322.3222

## 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.

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 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 desse setor, 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 ao solo melhoria em sua resistência. Ademais, devido o mármore ser rico em cálcio, também há possibilidade de ele 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.

## **METODOLOGIA**


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 1




**ETAPA 1**

- Revisão de literatura
- Definição de materiais a serem utilizados
- Definição de variáveis a serem analisadas



**ETAPA 2**

- Determinação do Teor Mínimo do cimento
- Preparação das Misturas, Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova para Ensaio de Compressão Simples
- Ensaio de Resistência a Compressão Simples



**ETAPA 3**

- Compilação dos dados e análise estatística
- Conclusões

## DESENVOLVIMENTO

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).

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, além da utilização desse resíduo garantir um

acréscimo de resistência ao solo até um percentual de 75% de adição, ele diminui o impacto de um problema regional.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Ensaio de Compressão Simples

A Tabela 1 mostra os dados dos corpos de prova ensaiados à compressão simples com massa específica e teor de cimento fixos de 15 kN/m<sup>3</sup> e 6%, respectivamente. Os corpos de prova de número 7 e 9 não puderam ser ensaiados pois apresentaram problemas estruturais. A Tabela 2 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 da Tabela 1 e o CP 18 da Tabela 8 foram desconsiderados por terem valores de resistência à compressão simples muito distintos quando comparados com os valores dos demais corpos de prova.

*Tabela 1 - Dados dos Corpos de Prova moldados.*

Nº do CP	Teor de cimento	Teor de resíduo	Teor de Umidade	Massa Específica Aparente Seca (kN/m <sup>3</sup> )	q <sub>u</sub> (kPa)	q <sub>u</sub> 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	-	

*Tabela 2 - Dados dos Corpos de Prova moldados.*

Nº do CP	Teor de cimento	Teor de resíduo	Teor de Umidade	Massa Específica Aparente Seca (kN/m <sup>3</sup> )	q <sub>u</sub> (kPa)	q <sub>u</sub> médio (kPa)
----------	-----------------	-----------------	-----------------	---	----------------------	----------------------------



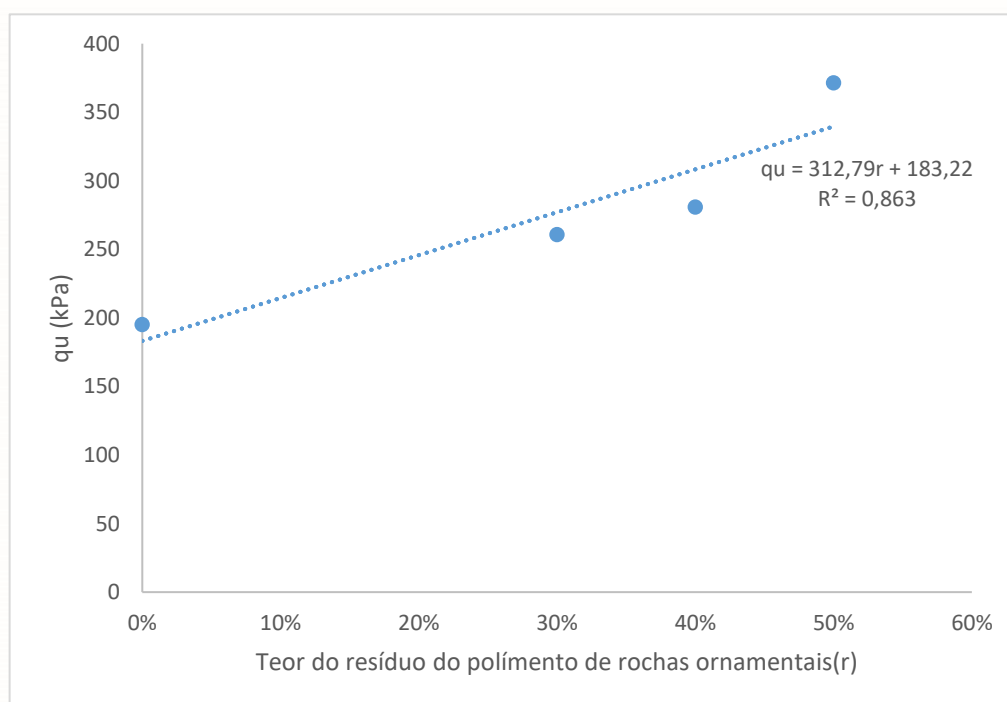
17	6%	0%	11,02%	15,0	205,58	195,25
18	6%	0%	16,09%	15,0	403,35	
19	6%	0%	16,09%	15,0	184,92	

Fonte: Braz (2018)

A Figura 7 foi elaborada com os valores médios fornecidos nas Tabelas 1 e 2. Nela pode ser observada a variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função do teor de resíduo do polimento de rochas ornamentais em cada CP.

Avaliando a Figura 1, 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 1 - Variação de resistência à compressão simples em relação a quantidade de resíduo presente nas amostras.



### Comparativo entre diferentes estabilizantes químicos

A Tabela 3 expõe os resultados obtidos por Tenório (2018) ao avaliar a resistência à compressão simples do solo estabilizando-o com 6% de cal.

Tabela 3 - Dados obtidos por Tenório (2018) com adição de cal.

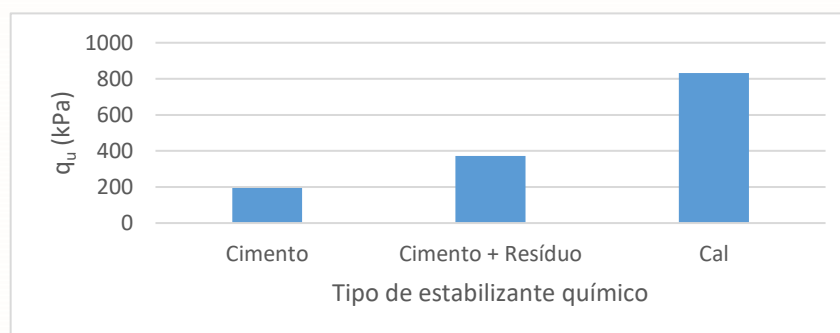
Nº do CP	Teor de cal	Teor de resíduo	Teor de Umidade	Massa Específica Aparente Seca (kN/m <sup>3</sup> )	q <sub>u</sub> (kPa)	q <sub>u</sub> médio (kPa)
23	6%	0%	18,60%	15,1	873,82	832,04
24	6%	0%	18,60%	15,2	778,13	
25	6%	0%	18,60%	15,1	844,18	

Fonte: Tenório (2018)

A Figura 2 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. Nesta Figura é possível perceber que a adição do resíduo do polimento de mármore à mistura solo-cimento traz melhoras aos resultados de q<sub>u</sub>.

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 2 - Comparativo entre diferentes misturas para estabilização do solo.





### Composições de insumos necessários para estabilização de 1m<sup>3</sup> com os diferentes estabilizantes químicos

As Tabelas 4 a 6 mostram as composições das quantidades das misturas solo-cimento, solo-cimento-resíduo do polimento do mármore e solo-cal para estabilizar 1 m<sup>3</sup> 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.

*Tabela 4 - Composição de 1m<sup>3</sup> de solo estabilizado 6% de cimento.*

Composição do solo + Cimento				
γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	Teor de Cimento (%)	m (Kg)	Cimento (Kg)	Solo (Kg)
15,0	6	1500,00	90,00	1410,00

*Tabela 5 - Composição de 1m<sup>3</sup> de solo estabilizado 6% de cimento e 50% de resíduo de mármore.*

Composição do solo + Cimento + Resíduo de mármore							
γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	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

*Tabela 6 - Composição de 1m<sup>3</sup> de solo estabilizado 6% de cal.*

Composição do solo + Cimento				
γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	Teor de Cal (%)	m (Kg)	Cal (Kg)	Solo (Kg)
15,0	6	1500,00	90,00	1410,00

### Composições de custos para estabilização de 1m<sup>3</sup> 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. A Tabela 7 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. As Tabelas 8 a 10 mostram o resultado obtido.

Tabela 7 - 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

Tabela 8 - Composição de custos para estabilizar 1m<sup>3</sup> de solo com cimento.

1m <sup>3</sup> 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
<b>TOTAL</b>				<b>R\$47,70</b>

Tabela 9 - Composição de custos para estabilizar 1m<sup>3</sup> de solo com cimento e resíduo do polimento de mármore.

1m <sup>3</sup> 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
<b>TOTAL</b>				<b>R\$47,70</b>

Tabela 10 - Composição de custos para estabilizar 1m<sup>3</sup> de solo com cal.

1m <sup>3</sup> 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
<b>TOTAL</b>				<b>R\$47,70</b>

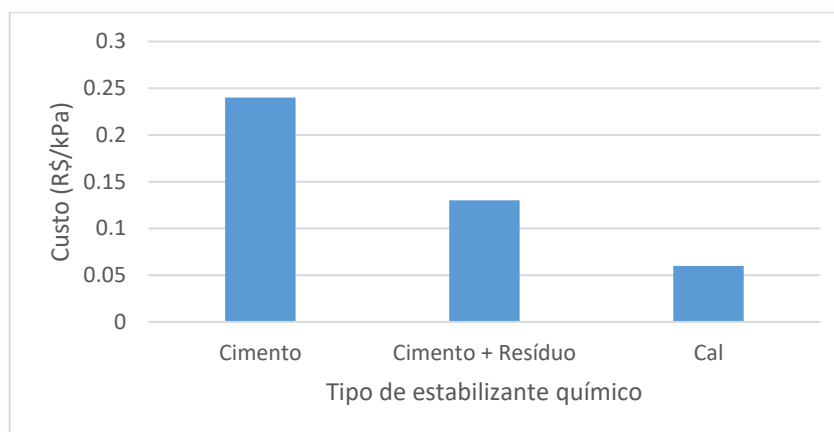
A Figura 3 mostra os valores para aumentar em 1kPa a resistência de 1m<sup>3</sup> de solo para cada um dos custos apresentados anteriormente. Foi feita uma média dos valores de

resistência à compressão simples apresentados nos tópicos anteriores para cada tipo de estabilizante químico. A Tabela 11 expõe os valores utilizados na Figura 13.

*Tabela 11 - Valores médios de resistência à compressão simples e custo por kPa elevado do solo.*

<b>Tipo de estabilizante químico</b>	<b>Resistência à compressão simples (kPa)</b>	<b>Valor para melhorar 1m<sup>3</sup> de solo (R\$)</b>	<b>Custo para elevar 1 kPa (R\$/kPa)</b>
Cimento	195,25	47,70	0,24
Cimento + Resíduo	371,38	47,70	0,13
Cal	832,04	47,70	0,06

Figura 3 - 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.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 ( $\gamma_d$ ) de 15 kN/m<sup>3</sup>. 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 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.

## 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.



