

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

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 melhoramento de solos desenvolvido e colocado à disposição dos engenheiros civis. A técnica em questão refere-se ao melhoramento das características dos solos através da adição de produtos químicos, sendo o cimento um dos mais frequentemente utilizados. Assim, o objetivo principal desta pesquisa é a utilização do aditivo cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CP V ARI) a fim de tornar mais efetivo o desempenho de um solo expansivo proveniente do município de Paulista - PE a nível mecânico e a nível de durabilidade. O aditivo foi testado a três teores distintos (4, 6 e 8%) e a diferentes pesos específico aparente secos (14, 15 e 16 kN/m<sup>3</sup>). As etapas experimentais avaliaram a adequabilidade do solo e a mudança das suas características recorrendo a ensaios de análise granulométrica, compactação Proctor, limites de consistência e compressão simples. Foi possível concluir a caracterização do solo estudado, analisou-se que o solo trata-se de uma como argila inorgânica de mediana plasticidade (CL) com baixa compressibilidade. Foi apresentada a eficiência do aditivo escolhido através dos gráficos, onde foi mostrado que para maiores teores de cimento, a amostra apresenta maior resistência a compressão. Para maior compactação, também temos o aumento da resistência. Além disso, foi possível observar que a redução na porosidade da mistura compactada promove o aumento da resistência à compressão simples do solo-cimento estudado, independentemente da quantidade de cimento utilizado.

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

## INTRODUÇÃO

O material mais utilizado na Engenharia Geotécnica é o solo e este apresenta características muito complexas e variáveis (DALLA ROSA, 2009). Com a grande expansão na última década da construção civil, cada vez mais os empreendimentos estão sendo alocados em áreas que possuem solos com baixa capacidade de suporte. Algumas soluções vêm sendo adotadas para minimizar esses problemas, entre elas, está a realização de

<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) 3522.3222

fundações profundas, ou a substituição do material de baixa qualidade por um de boa qualidade.

A primeira solução apresenta um alto custo, já a segunda, depende de jazidas e bota-foras próximos ao local da obra, o que pode representar, além de um alto custo, um grande problema ambiental. Uma terceira solução é o melhoramento deste solo através da compactação do material e a estabilização física e química com a adição de materiais estabilizantes, sendo eles, ativadores, como cal ou cimento.

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

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

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

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

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

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

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

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

## **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 experimental dessa pesquisa foi dividido em duas etapas. A primeira etapa destinou-se a obtenção, preparação e caracterização do solo. A segunda etapa teve como objetivo a análise da resistência mecânica do solo no estado, estabilizado, por meio do ensaio de resistência à compressão simples. O fluxograma apresentado na Figura 1 mostra o programa de pesquisa e o programa experimental adotado para esse trabalho.

Figura 1: Fluxograma da pesquisa

#### ETAPA 1

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

#### ETAPA 2

- Coleta da amostra no campo
- Caracterização do solo
- Caracterização do aditivo
- 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

A adição de cimento nas misturas cresce com o aumento do percentual de finos presentes no solo. Por isso, as amostras de solo-cimento devem ser primeiramente submetidas a ensaios de compactação, utilizando-se a energia adequada para se obter maior grau de compactidade. Além disso, o material deve passar por um período de cura para promover o endurecimento da mistura e ser submetida posteriormente ao ensaio de compressão simples, de forma a avaliar os avanços de resistência mecânica e durabilidade.

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

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

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios obtidos na fase experimental da pesquisa. Primeiramente são apresentados os resultados de caracterização

(83) 3322.3222

contato@conapesc.com.br

www.conapesc.com.br

física do solo: distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos, massa específica real, limites de Atterberg, sendo discutidos ainda os resultados das curvas de compactação. Posteriormente são demonstradas as análises referentes aos ensaios de resistência mecânica, o ensaio de resistência à compressão simples.

### **Ensaio de Caracterização Física**

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

### **Determinação do peso específico dos grãos do solo**

A Tabela 1 apresenta os valores de massa específica do solo e os índices de consistência.

Tabela 1: Limites de Atterberg e massa específica real do solo

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

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

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

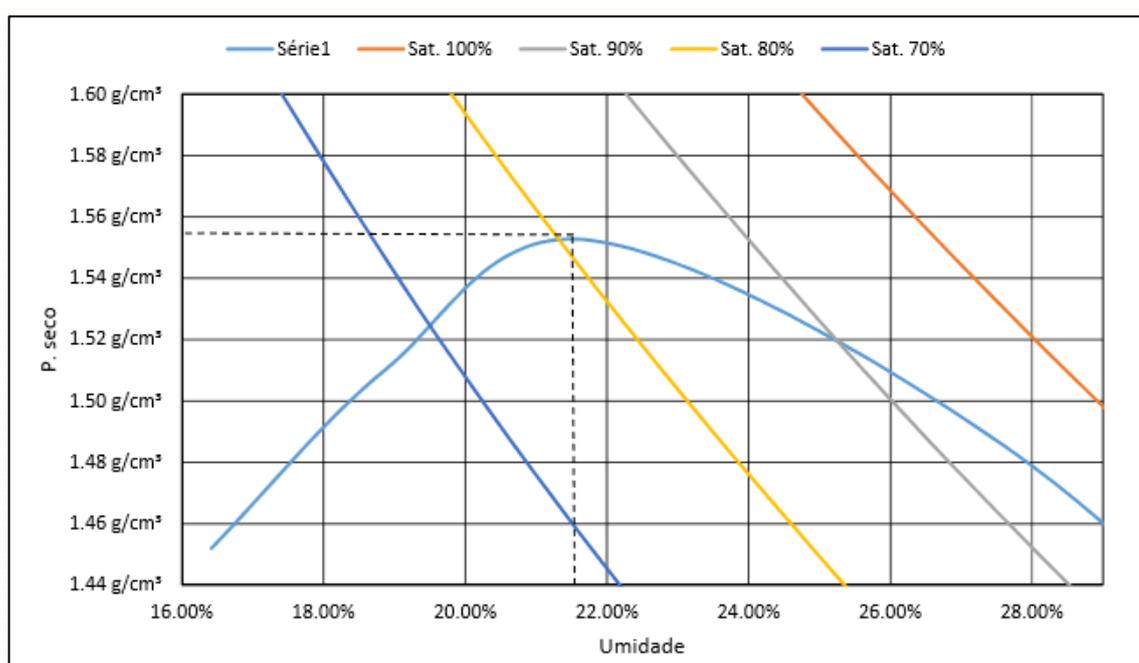
A partir dos resultados da análise granulométrica e dos limites de Atterberg foi possível realizar a classificação do solo. Esse foi classificado pela metodologia Highway

Research Board (HRB) como material argiloso (A-7-6) e pelo método do Sistema Unificado de Classificação de solos (SUCS) como argila inorgânica de mediana plasticidade (CL) com baixa compressibilidade.

### Curva de compactação

A Figura 4 apresenta a curva de compactação do solo ensaiado para a energia normal.

Figura 4: Curva de compactação do solo



A partir da análise da Figura 4, temos os valores de umidade ótima (21,80%) e peso específico seco máximo (1,55 g/cm³) para o solo estudado.

A Figura 4 também apresenta as curvas de saturação do solo, as quais correspondem ao lugar geométrico dos valores de umidade ótima e massa específica aparente seca para o qual o solo encontra-se saturado.

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

## Ensaio Mecânico

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

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

## Ensaio de compressão simples

Os corpos de prova ensaiados à compressão simples têm suas características demonstradas nos gráficos a seguir.

Baseados nos dados relativos aos corpos de prova, formularam-se as Figuras 5 a 8. A Figura 5 apresenta as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cimento. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo peso específico aparente seco.

Os dados exibidos na Figura 5 permitem verificar que, para as amostras curadas 28 dias, quanto maior o teor de cimento maior a resistência à compressão simples e esta variação é linear, dentro dos teores estudados. Para o mesmo peso específico aparente seco, comparamos diferentes teores de cimento. Fixando o teor de cimento, observou-se também que quanto mais compactado o solo (quanto maior a massa específica aparente seca) maior a resistência à compressão simples ( $q_u$ ).

Figura 5: Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cimento das amostras

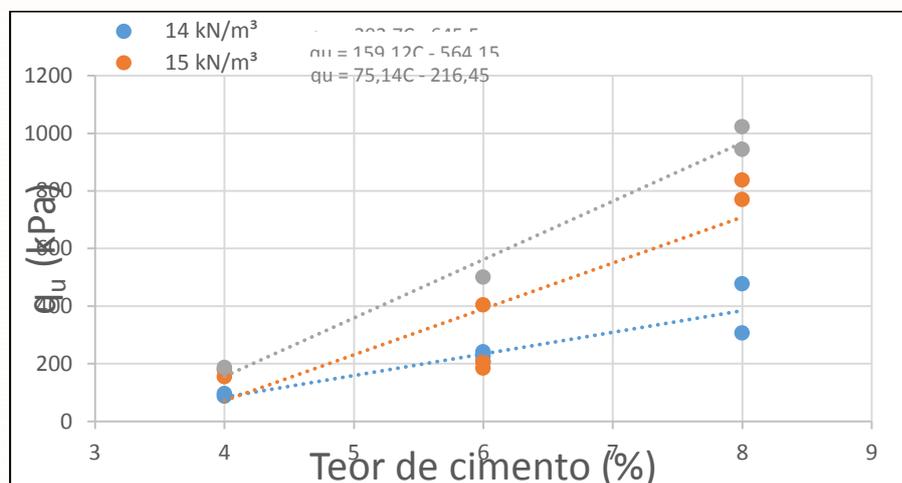
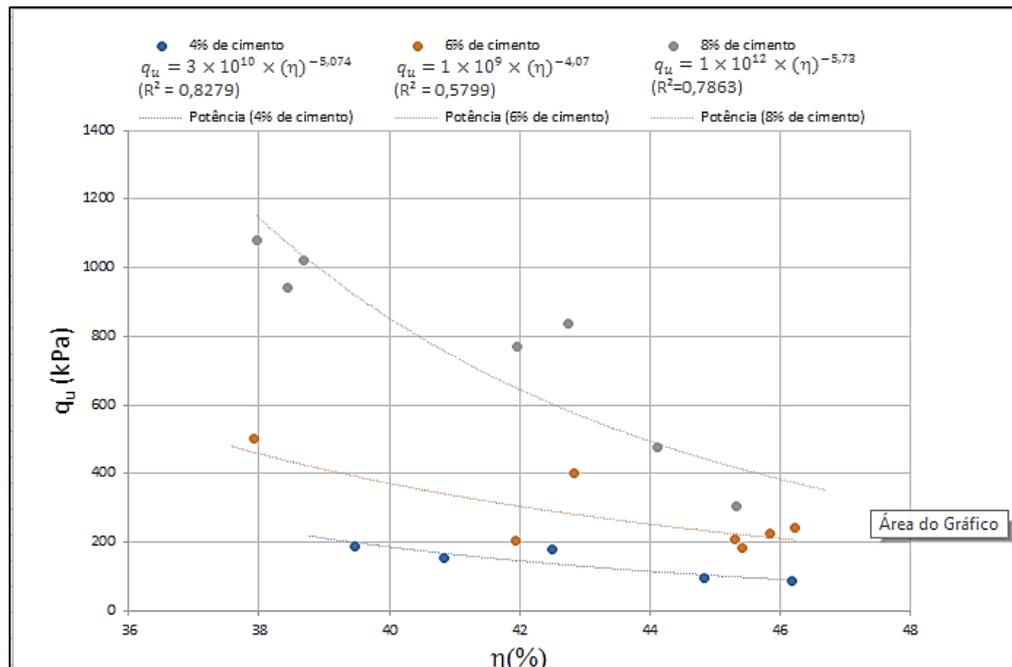


Figura 6: Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade dos corpos de prova curados



A Figura 6 apresenta a variação da resistência à compressão simples devido à variação porosidade dos corpos de prova. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cimento. Esta figura nos permite observar que a redução na porosidade da mistura compactada promove o aumento da resistência à compressão simples do solo-cimento estudado, independentemente da quantidade de cimento utilizado. Observou-se novamente (com a porosidade fixada), que quanto maior o teor de cimento maior a resistência à compressão simples ( $q_u$ ).

Foram associados os dados da resistência a compressão simples com a variação da relação porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/Civ$ ), como pode ser observado nas Figuras 7 e 8.

As Figuras 7 e 8 expõem a variação de resistência à compressão simples das amostras curadas. Cada uma das curvas da Figura 7 possui um teor de cimento (4%, 6% e 8%). Observou-se que as curvas possuem comportamento único, assim foi possível apresentá-las de forma unificada na Figura 8.

Uma análise que pôde ser feita com a Figura 7 foi a observação de dois pontos de diferentes teores e massa específicas que tenderam para o mesmo valor de resistência à compressão simples. O ponto 1 possui 8% de teor de cimento e  $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$ , e o ponto 2 possui 6% de teor de cimento e  $\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$ . Os dois pontos estão aproximados ao valor de resistência de 477,34 kPa. Pode-se analisar mais uma vez que para maior compactação ou maior teor de cimento obtém-se maiores valores de resistência. Além disso, essa observação pode fazer parte da escolha do

procedimento de melhoramento de solo a ser utilizado em uma obra: utilizar mais cimento ou maior compactação. Essa decisão dependerá do prazo e do capital da obra. Logo a relação  $\eta/C_{iv}$  pode ser usada para dosar a mistura solo cimento estudada.

Figura 7: Relação entre porosidade/teor volumétrico de cimento e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados (curvas para cada teor)

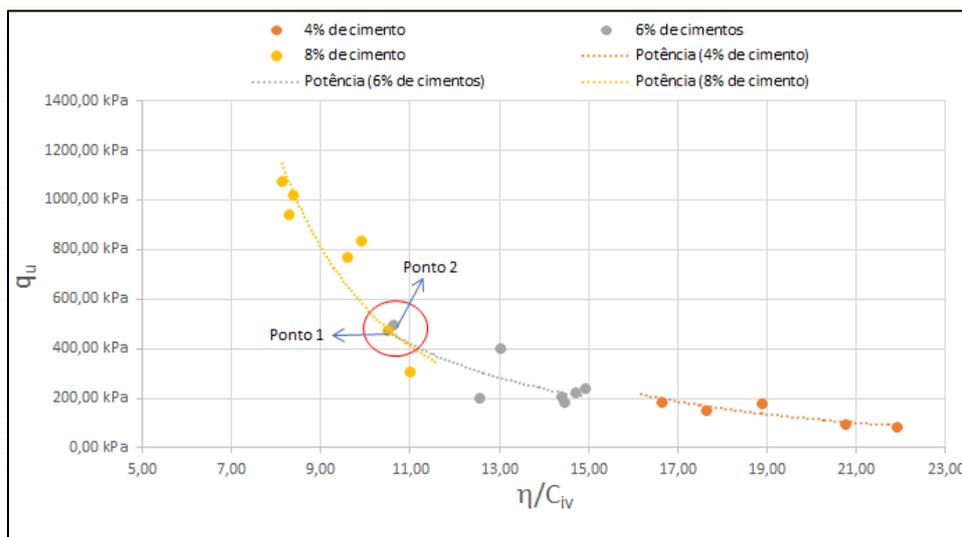
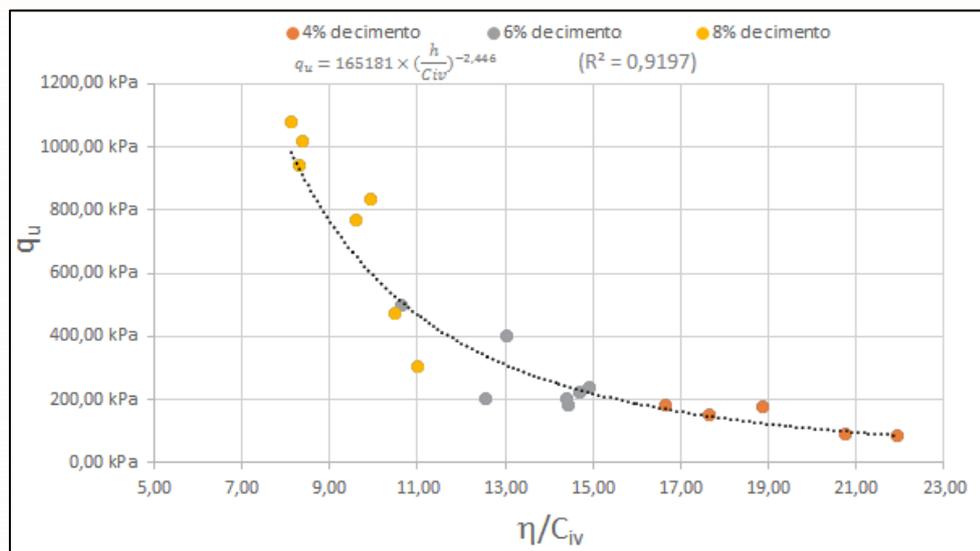


Figura 8: Relação entre porosidade/teor volumétrico de cimento e a resistência à compressão simples para os corpos de prova curados (curva unificada)



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a finalização da pesquisa, foi possível concluir os objetivos propostos. Dentre eles, a caracterização geotécnica do solo analisado. Esse estudo foi realizado antes dos

processos de melhoramento do solo com o cimento Portland. O solo estudado trata-se de uma argila inorgânica de mediana plasticidade (CL) com baixa compressibilidade.

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

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

## REFERÊNCIAS

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

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

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